



o.Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Karl Kordina
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Technische Universität Braunschweig

BIEGETRAGFÄHIGKEIT VON MAUERWERK MIT DEN
EIGENSCHAFTEN ALTER BAUSUBSTANZ UNTER
DRUCKBEANSPRUCHUNG

Abschlußbericht

vorgelegt von

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Karl Kordina
Dipl.-Ing. Erhard Gunkler

Juni 1988

Das Forschungsvorhaben wurde gefördert

- 1986: vom Bundesamt für Zivilschutz, Aktenzeichen ZS8-122-42
- 1987: vom Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau
Aktenzeichen B I 7 810787-6



I

Inhaltsverzeichnis

	<u>Blatt</u>
<u>1.0 Einleitung und Aufgabenstellung</u>	1
<u>2.0 Die Eigenschaften alter Bausubstanz</u>	
2.1 Allgemeines	2
2.2 Untersuchung von aus alten Gebäuden entnommenen Mauerwerkskörpern, Mauersteinen und Mörtelproben	2
<u>3.0 Versuchsprogramm und Beschreibung der Prüfeinrichtung</u>	
3.1 Untersuchungen an Wänden und Wandstreifen (Hauptversuche HV)	6
3.1.1 Abmessungen der Prüfwände	6
3.1.2 Belastung der Prüfwände	6
3.1.3 Versuchsprogramm	7
3.2 Ergänzende Untersuchungen an Norm-Prüfkörpern zur Bestimmung der Materialkennwerte (Nebenversuche NV)	9
3.3 Ergänzende Untersuchungen an aus Bohrkernen hergestellten Quadern (Kleinprüfkörper KV)	11
3.4 Beschreibung der Prüfeinrichtung für die Untersuchung raumhoher Mauerwerkswände	12
3.4.1 Allgemeines	12
3.4.2 Untersuchung der einachsigen Biegetragfähigkeit	13
3.4.3 Untersuchung der zweiachsigen Biegetragfähigkeit	14
<u>4.0 Versuchsdurchführung und Prüfergebnisse</u>	
4.1 Untersuchungen an geschoßhohen Wandprüfkörpern (Hauptversuche HV)	15
4.2 Ergänzende Untersuchungen: Ermittlung von E-Modul und Druckfestigkeit des Mauerwerks	18
4.3 Ermittlung der Druckfestigkeit an Kleinversuchskörpern sowie eines Umrechnungsfaktors zu den Ergebnissen von Druckfestigkeitsprüfungen an Norm-Prüfkörpern	22

II

Blatt5.0 Rechnerische Überprüfung der Versuchsergebnisse an raumhohen Wänden

5.1	Statische Systeme und Lastverteilung der Horizontalbeanspruchung	26
5.2	Ermittlung der Schnittgrößen	28
5.2.1	Tragmodell	28
5.2.2	Zusammenstellung der Schnittgrößen von einachsig lastabtragenden Versuchswänden	35
5.2.3	Interaktion zwischen Biegemoment und Normalkraft	37
5.3	Rechnerische Überprüfung der gemessenen Durchbiegungen	39
5.3.1	Allgemeines	39
5.3.2	Erläuterung des verwendeten Rechenverfahrens	40
5.3.3	Materialkennwerte und Einspannverhältnisse	41
5.3.3.1	Materialgesetze	41
5.3.3.2	Einspanngrade der Mauerwerkswände II/3 und II/6	43
5.3.4	Wiedergabe und Kommentierung der rechnerisch ermittelten Durchbiegungen	44

6.0 Rechnerische Vorherbestimmung der Tragfähigkeit von einachsig lastabtragenden Mauerwerkswänden

6.1	Allgemeines	47
6.2	Nachweis nach DIN 1053 Teil 2	48
6.3	Nachweis unter Verwendung eines zutreffenden Wertes der Mittendurchbiegung	51
6.4	Nachweis mit Hilfe eines praxisüblichen EDV-Stützenprogrammes	52
6.5	Ermittlung eines Traglastdiagramms	53
6.6	Vorschläge zur Formulierung eines Sicherheitskonzeptes und Einfluß der Bewehrung	55

III

	<u>Blatt</u>
<u>7.0 Tragfähigkeit von kreuzweise lastabtragenden Mauerwerks- wänden</u>	
7.1 Allgemeines	59
7.2 Grundlagen	59
7.3 Rechnerische Überprüfung der Versuchs- ergebnisse	63
7.4 Rechnerische Vorhersage der Tragfähigkeit	64
<u>8.0 Zusammenfassung</u>	68
<u>Literaturverzeichnis</u>	71
 <u>Anhang</u>	
9 Tabellen (ab Tabelle 15)	
79 Bilder (ab Bild 18)	

IV

ÜBERSICHT DER TABELLEN UND BILDER DES TEXTTEILS
DES ABSCHLUSSBERICHTES

<u>Tabelle:</u>	<u>Blatt</u>
01 Ergebnisse von Druckfestigkeitsprüfungen nach DIN 18 554 Teil 1 an altem Mauerwerk aus Braunschweig-Broitzem und nachträglich herge- stellten Norm-Prüfkörpern	3
02 : Druckfestigkeit aus alter Bausubstanz entnommener Mauerziegel	4
03 : Chemische Analyse nachträglich hergestellten "alten" Mauermörtels	5
04 : Raumgewicht, Biegezugfestigkeit und Druckfestig- keit der Versuchsserien I bis III	6
05 : Angaben zu den verwendeten Steinsorten	8
06 : Mischungsverhältnisse der verwendeten Mauermörtel	8
07 : Mauerwerkswände der Hauptversuche	10
08 : Wesentliche Versuchswerte der Hauptversuche	17
09 : Ergebnisse von zentrisch belasteten Norm- Prüfkörpern	20
10 : Ergebnisse exzentrisch belasteter Norm-Prüfkörper	21
11 : Umrechnungsfaktoren für Druckfestigkeitswerte von Mauerwerk	24
12 : Aufnehmbare Schnittgrößen der Mauerwerkswände der Versuchsserien I und II	35
13 : Traglastberechnungen nach DIN 1053 Teil 2, Abschnitte 6.7 und 7.2	50
14 : Traglasten der kreuzweise biegebeanspruchten Mauerwerkswände III/1 und III/2	63

V

<u>Bild:</u>	<u>Blatt</u>
01 : Kleinprüfkörper	12
02 : Ermittlung von Druckzonenkennwerten	15
03 : Statische Ersatzsysteme und Zuordnung der einachsig beanspruchten Versuchswände	26
04 : Statisches System kreuzweise biegebeanspruchter Mauerwerkswände	27
05 : Belastung und qualitativer Verlauf am statisch bestimmten unverformten System	29
06 : Belastung und qualitativer Schnittgrößenverlauf am unverformten Tragsystem mit Kopf- und Fußeinspannungen	30
07 : Vereinfachtes Tragmodell bei gelenkiger Lagerung	30
08 : Äußere Schnittgrößen und innere Kräfte einer durch Biegung und Normalkraft beanspruchten Mauerwerkswand	31
09 : Traglastmoment $M_{0,u}^{II}$ infolge äußerer Belastung am unverformten System	33
10 : Berücksichtigung des Putzes am unverformten System	34
11 : Interaktionsdiagramme	38
12 : Gemessene und rechnerisch ermittelte Durchbiegungen sowie Biegemomente der Versuchswand II/3	45
13 : Druckspannungsverläufe exzentrisch beanspruchter Mauerwerksquerschnitte	49
14 : Traglastdiagramme	54
15 : Berücksichtigung von Sicherheitskonzepten in einem Traglastdiagramm	56
16 : Bruchlinien und Traglastformel nach der Bruchlinientheorie	62
17 : Traglastkurven von kreuzweise biegebeanspruchten Wänden	66

1.0 Einleitung und Aufgabenstellung

Im Rahmen eines vom Bundesamt für Zivilschutz geförderten Forschungsvorhabens wurde in dem Zeitraum von 1983 bis 1986 die Standsicherheit von Wänden in alter Bausubstanz unter statischer Horizontalbelastung des Mauerwerks untersucht /1/.

Bei den in situ durchgeführten Untersuchungen wurden in alten gemauerten Kellerwänden durch Schlitzen Wandpfeiler herausgetrennt und deren Tragfähigkeit bei horizontaler Druckbeanspruchung bestimmt. Auf diesem Wege wurden erste wertvolle Ergebnisse zur Biegetragfähigkeit des Mauerwerks in Abhängigkeit von der vertikalen Auflast gewonnen, jedoch zeigten sich bald die Grenzen eines derartigen Verfahrens: Mit zunehmender Durchbiegung der Wandpfeiler wächst die Größe der vertikalen Auflast, was deren Erfassung erheblich erschwert. Davon abgesehen erwies sich die Beschaffung geeigneter Untersuchungsobjekte als schwierig.

Im Hinblick auf eine Verallgemeinerung gewonnener Erkenntnisse ist es aber wichtig, die Tragfähigkeit der Mauerwerkswände bei horizontaler Belastung in Abhängigkeit von Auflast und Randbedingungen getrennt zu studieren. Deshalb erfolgte die Fortsetzung der Untersuchungen in einem Wandprüfstand des Instituts, der durch umfangreiche Umbauten an die Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens angepaßt werden mußte.

Daraus erwuchs nunmehr das Problem, Mauerwerk mit den Eigenschaften alter Bausubstanz neu zu erstellen, d.h. die Eigenschaften "alter Bausubstanz" zunächst quantitativ zu erfassen und dann Mauerwerk so herzustellen, daß es vergleichbare Eigenschaften hinsichtlich seiner baustoffspezifischen Kennwerte aufweist. Hierbei ist selbstverständlich nicht das Alter der Bausubstanz für die Tragfähigkeit entscheidend, sondern die Festigkeit des Mörtels (vorrangig!) und die der Ziegel oder anderen Steinmaterials zum Zeitpunkt der Beanspruchung.

2.0 Die Eigenschaften alter Bausubstanz

2.1 Allgemeines

Im Zusammenhang mit der Eignung gemauerter Kellerwände als horizontaler Raumabschluß von Schutzräumen gegenüber horizontalem Lastangriff (Druck) werden solche baulichen Gegebenheiten in Abhängigkeit von Erhaltungsaufwand, Raumaufteilung und Abmessungen der Außenwände verstanden, die in bis zu etwa 100 Jahre alten Gebäuden nach angemessener und wirtschaftlich sinnvoller Ertüchtigung einen hohen Schutz, möglichst Grundschutz, gewährleisten können. Die wesentlichen mechanischen Kennwerte zur Beschreibung der Biegetragfähigkeit sind Druckfestigkeit des Mauerwerks und der Mauersteine sowie die von Bindemittelart und -gehalt abhängige Druckfestigkeit des Mauermörtels.

2.2 Untersuchung von aus alten Gebäuden entnommenen Mauerwerkskörpern, Mauersteinen und Mörtelproben

Im ersten Untersuchungsabschnitt wurden aus den Wänden eines alten Kasernengebäudes in Braunschweig-Broitzem aus Vollziegeln bestehende Mauerwerkskörper mit einer Dicke von 12,5 cm entnommen und anschließend einer zentrischen Druckprüfung unterzogen /1/. Die Abmessungen der Probekörper und die Durchführung der Prüfung entsprachen DIN 18 554 "Ermittlung der Druckfestigkeit und des E-Moduls von Mauerwerk", Teil 1, wobei die Lastaufbringung kraftgesteuert bzw. weggesteuert erfolgte. Die Prüfergebnisse sind Tabelle 01 zu entnehmen. Zum Vergleich sind die entsprechenden Ergebnisse für einige aus "altem" Material neu hergestellte Norm-Prüfkörper mit angegeben; ein signifikanter Unterschied läßt sich nicht feststellen.

Versuchs- körper	Material	Wanddicke [cm]	Schlankheit h/d	weg- gesteuert	kraft- gesteuert	Druck- festigkeit β_s [MN/m ²]	E-Modul [MN/m ²]	Stauchung im Scheitelpunkt ϵ_s [‰]	
Broitzem	Probekörper 1	Mz	12,5	3,08		x	12,10	8962,6	- 2,39
	Probekörper 2	Mz	12,5	3,09	x		7,80	5177,3	- 2,38
	Probekörper 3	Mz	12,5	3,08	x		8,77	5846,7	- 2,31
nachträglich hergestellt	NI/1.1	MG II MZ 12 - 1,6 (RF)	25	3,06	x		7,40	5466,7	- 2,40
	NI/2.1		25	3,06	x		10,03	8000,0	- 1,25
	NI/2.2		25	3,06	x		9,26	8819,0	- 1,50
	NI/4.1		12,5	2,82	x		14,62	8050,0	- 2,03
	NI/4.2		12,5	2,74	x		16,01	10890,0	- 1,96
	NI/5.1		12,5	2,80	x		10,51	8750,0	- 1,31

Tabelle 01: Ergebnisse von Druckfestigkeitsprüfungen nach DIN 18 554
Teil 1 an alten altem Mauerwerk aus Braunschweig-Broitzem und
nachträglich hergestellten Versuchskörpern

Zusätzlich wurden Mörtelproben und Mauersteine entnommen: Die Mörtelproben wurden auf Bindemittelart und -gehalt chemisch untersucht und die Steindruckfestigkeit nach DIN 105 ermittelt. Zur Abrundung des Gesamtbildes über die Eigenschaften alter Bausubstanz wurden weitere Mörtelproben und Mauersteine aus Vollziegeln auch aus anderen Abbruchgebäuden in Braunschweig analysiert, im folgenden mit den Ortsnamen Lehre und Kneitlingen gekennzeichnet.

Die Tabellen 15 bis 17 fassen die Untersuchungsergebnisse der Mörtelanalysen zusammen. Dabei fällt auf, daß die Mörtelproben einen geringen Bindemittelanteil aufweisen. Dies wird als die wesentliche Eigenschaft alter Bausubstanz betrachtet. Dabei soll nicht unterstellt werden, der Bindemittelgehalt sei von Anfang an so niedrig gewesen, sondern er dürfte eher im Laufe der Zeit durch Feuchteinwirkung aus dem Mörtel herausgelöst worden sein.

Auf Grund der chemischen Analyse sind die Bindemittel der Mörtelproben als Kalkhydrat bis hin zu hochhydraulischen Kalken anzusprechen. Eine quantitative Aussage über die Größe der Druckfestigkeit des Mauermörtels im Hinblick auf die Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauerwerk läßt sich durch eine chemische Untersuchung nicht erreichen. Allerdings ist

wegen der vorliegenden Mischungsverhältnisse nach Raumteilen zwischen Bindemittel und Zuschlagstoff bis hin zu 1:5,4 davon auszugehen, daß die untersuchten Mörtel nach DIN 1053 Teil 1, Abschnitt 4.2 und Tabelle 6 hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit in die Mörtelgruppe I einzuordnen sind.

Die Druckfestigkeitsprüfungen der Mauerziegel nach DIN 105 haben unterschiedliche Ergebnisse erbracht. Aus Tabelle 02 sind Mittelwerte der Ziegeldruckfestigkeiten von 20,40 bis 32,27 N/mm² bei einer Streubreite bis zu 36 % zu entnehmen.

Bezeichnung *)	Abmessungen $l_s/b_s/h_s$ [cm]	Anzahl der geprüften Mauerziegel	Mittelwert der Rohdichte [kg/dm ³]	Druckfestigkeit		
				Mittelwert [MN/m ²]	Standard- abweichung [MN/m ²]	Variations- koeffizient [%]
Bröitzem 1	25,7/12,7/6,6	6	1,73	32,27	11,73	0,363
Bröitzem 2	25,6/12,5/6,5	18	1,72	31,63	6,29	0,199
Lehre 1	25,1/12,2/6,6	6	1,51	20,40	3,73	0,189
Lehre 2	25,5/12,5/6,6	18	1,63	24,08	8,66	0,360
Kneitlingen	25,3/12,1/6,8	18	1,77	25,73	4,65	0,181

*) Die Art der Bezeichnung gibt gleichzeitig Auskunft über den Entnahmestort

Tabelle 02: Druckfestigkeit aus alter Bausubstanz entnommener Mauerziegel

Für das Aufmauern von geschoßhohen Prüfwänden erschien es nicht sinnvoll, einen Mauermörtel mit allen in den Tabellen 15 bis 17 genannten Bestandteilen künstlich herzustellen. Grundsätzlich sollte der für die einzelnen Untersuchungen zu verwendende Mörtel einen extrem geringen Bindemittelgehalt und damit auch eine sehr geringe Druckfestigkeit aufweisen, um zu erreichen, daß der Mauermörtel für die nachträglich aufzumauernden Prüfwände bereits nach 28 Tagen die gewünschten Eigenschaften besitzt.

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten experimentellen Untersuchungen an Wänden wurden in drei, zeitlich getrennten Abschnitten (Versuchsserien I bis III) durchgeführt. Dementsprechend wurden die Versuchskörper vorab zu verschiedenen Zeiten hergestellt und ihre Eigenschaften in Abhängigkeit vom Alter - vor allem zum Zeitpunkt der Untersu-

chung der Wände - geprüft. Tabelle 03 gibt Auskunft über die chemischen Analysen der in den Versuchsserien I bis III verwendeten Mauermörtel. Die zugehörigen Mörteldruckfestigkeiten nach DIN 18 555 Teil 3 sind Tabelle 04 zu entnehmen.

A n a l y s e	I		II		III	
Glühverlust 1000 °C	3,37	Lösliches, glühver- lustfrei Gew.-%	2,38	Lösliches, glühver- lustfrei Gew.-%	2,35	Lösliches, glühver- lustfrei Gew.-%
davon CO ₂	-		-		-	
Salzsäureunlösliches	86,21		92,19		90,40	
lösli. Kieselsäure (SiO ₂)	1,33	12,76	0,66	10,95	1,15	14,65
Eisen (Fe ₂ O ₃)	0,32	3,07	0,42	6,96	0,39	4,97
Aluminium (Al ₂ O ₃)	0,66	6,33	0,29	4,81	0,50	6,37
Titan (TiO ₂)	/	/	/	/	/	/
Calcium (CaO)	7,15	68,62	3,86	64,01	5,05	64,33
Magnesium (MgO)	0,50	4,80	0,65	10,78	0,40	5,10
Sulfat (SO ₃)	0,41	3,93	0,15	2,49	0,36	4,59
Summe ohne CO ₂	99,95	99,52	100,60	100,60	100,6	100,01
MISCHUNGSVERHÄLTNIS	Verfahren: DIN 52 170, Pisters, Hummel-Charisius					
nach Gewichtsteilen	1:7,0		1:16,98		1:9,7	
nach Raumteilen *)	1:5,4		1:10,45		1:4,5	
Bindemittel	Kalkhydrat + Portlandzement		Kalkhydrat + Portlandzement		Kalkhydrat + Portlandzement	

*) Umrechnung als hydraulischer Kalk: $\rho = 0,8 \text{ kg/dm}^3$

Tabelle 03: Chemische Analyse nachträglich hergestellten "alten" Mauermörtels

	Mörtelprismen der Versuchsserien								
	I			II			III		
Ausbreitmaß [cm]	16,9 - 19,9			19,0			20,2		
Prüfalter	Raumgewicht [g/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Raumgewicht [g/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Raumgewicht [g/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
28 Tage	1851	1,65	4,42	1699	0,14	0,22	1688	0,21	0,43
55 Tage	1858	1,48	4,58	1691	0,04	0,22	1670	0,20	0,37
150 Tage	1857	1,58	4,49	1607	0,04	0,21	1659	0,14	0,25

Lagerungsbedingungen: 7 Tage Feuchtkasten, anschließend Normalklima 20/65

Tabelle 04: Raumgewicht, Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit der Mörtelprismen für die drei Versuchsserien

3.0 Versuchsprogramm und Beschreibung der Prüfeinrichtung

3.1 Untersuchungen an Wänden und Wandstreifen (Hauptversuche HV)

Im folgenden wird weiterhin unterschieden zwischen den Versuchsserien I bis III. In den Serien I und II wurde der einachsige Lastabtrag untersucht; der wesentliche Unterschied zwischen I und II ist die Güte des Mauermörtels (siehe Tabelle 06). In Serie III wurde das zweiachsige (kreuzweise) Biegetragverhalten von vertikal und horizontal, senkrecht zu ihrer Ebene, belasteten Mauerwerkswänden studiert.

3.1.1 Abmessungen der Prüfwände

Um das Biegetragverhalten von gemauerten Wänden zu studieren, wurden in den Versuchsabschnitten I und II Wandstreifen mit einer Breite von 60 bzw. 61,5 cm und 125 cm geprüft; ihre Höhe betrug je nach "Reichs"- oder DIN-Format der verwendeten Mauersteine 2,385 oder 2,375 m. Die Dicke der geprüften Wandstreifen betrug 12,5 cm, 17,5 cm und 24 cm bzw. 25 cm.

Die Höhe der auf ihre zweiachsige Tragverhalten zu untersuchenden Wände der Versuchsserie III betrug 2,0 m, ihre Länge 3,0 m und ihre Dicke 25 cm. Zwei vertikale Abstützungen im Abstand von jeweils 50 cm von den Wandenden ergaben Kraglängen bzw. Stützweiten von 0,5:2,0:0,5 m in horizontaler Richtung.

3.1.2 Belastung der Prüfwände

Bei den Untersuchungen sollte das Bruchtragverhalten studiert werden. Die jeweilige Größe der aufzubringenden Vertikallast orientierte sich deshalb an dem Bereich unterhalb des Balance-Points eines Interaktionsdiagramms zwischen aufnehmbarer Normalkraft (Druckkraft) und Biegemoment /1/ im Bruchzustand. Eine Beschränkung der maximal aufzubringenden Vertikallast wie in /2/ angenommen - etwa in Anlehnung an die zulässigen Auflastspannungen in Abhängigkeit von der Schlankheit h_k/d der Prüfwände gemäß

DIN 1053 Teil 1 - wurde nicht vorgenommen. Dies erschien allein schon deswegen nicht sinnvoll, weil die Festlegung zulässiger Vertikallasten von Gebrauchslastspannungen ausgeht.

Aufgrund der in /1/ beschriebenen Schwierigkeiten bei der Ermittlung der vertikalen Belastung von alten Kellerwänden in situ sollten die Belastungen der horizontalen Flächenlasten p_H und der vertikalen Auflast q_V im Prüfstand nunmehr unabhängig voneinander erfolgen und dabei insbesondere die lotrechte Last konstant, mithin unabhängig von Horizontallast und durchbiegungsbedingter Zwängung erfolgen. Deshalb wurde die Vertikallast jeweils zu Beginn der Untersuchungen vor Aufbringung des Horizontaldruckes unter Verwendung hydraulischer Prüfzylinder eingetragen und konstant gehalten.

Nach den Anforderungen an den Grundschatz müssen nach /4/ die äußeren Umfassungswände von Schutzräumen in Kellern einem Horizontaldruck von 10 kN/m^2 ($= 0,1 \text{ bar}$) bei einer gleichzeitig wirkenden Deckenauflast je nach Gebäudeart von $10 - 15 \text{ kN/m}^2$ standhalten können.

Die Auslegung der horizontalen Belastungseinrichtung erfolgte jedoch unter dem Gesichtspunkt, daß auf jeden Fall der Bruch der Prüfwände erreicht wird. Deshalb wurde die horizontale Belastungseinrichtung auf einen maximalen Horizontaldruck p_H von 2 bar ausgelegt.

3.1.3 Versuchsprogramm

Es wurden insgesamt 12 Wandstreifen der Serien I und II auf ihre einachsige und 2 Wände der Serie III auf ihre zweiachsige Biegetragfähigkeit untersucht und dabei variiert:

- Mauerstein- und Mörtelqualität
- Streifenbreite und -dicke
- Vertikale Auflast

Die zur Verfügung stehenden Steinsorten sind Tabelle 05 zu entnehmen.

Steinmaterial	Bezeichnung	Abmessungen / Format	Mittelwert der Druckfestigkeit [N/mm ²]
Mauerziegel	Mz	12,5 x 6,6 x 25 cm / RF	20 - 28
Kalksandsteine	KS-Vollstein	2 DF	25,1
	KS-Vollstein	3 DF	26,3
Hochlochziegel	HLz B	2 DF	34,4
	HLz B	3 DF	36,3

Tabelle 05: Angaben zu den verwendeten Steinsorten

Sämtliche Mauersteine wurden vor ihrer Verwendung einer Güteprüfung nach DIN 105 bzw. DIN 106 unterzogen, s. Tabelle 22.

Die Bestandteile des Mauermörtels waren

- Mauer sand der Körnung 0/2
- Kalkhydrat
- Zement PZ 350 F

Die Mischungsverhältnisse sind Tabelle 06 zu entnehmen; besondere Beachtung verdient die Mischung für die Serien II und III.

Versuchs- serie	Mischungsverhältnis Sand : Kalkhydrat : Zement	Mittelwert der Prismendruckfestigkeit nach 28 Tagen [N/mm ²]	Mörtelgruppe nach DIN 1053 T 1
I	8 : 1 : 1/2	4,42	II
II	14 : 1 : 1/2	0,22	I
III	14 : 1 : 1/2	0,43	I

Tabelle 06: Mischungsverhältnisse der verwendeten Mauermörtel

Alle Mauermörtel wurden in kellengerechter Konsistenz verarbeitet. Aus den Frischmörteln wurden mindestens 3 Prismensätze als Mörtelproben entnommen und die Mörteldruck- und Biegezugfestigkeit jeweils

- nach 28 Tagen
- zum Zeitpunkt der Prüfung der Norm-Prüfkörper (NV) und
- während der Prüfung der Kleinversuchskörper (KV)

ermittelt. Die Größe der Mörtelprismen betrug $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Diese wurden gemäß DIN 18 555 Teil 3, Abschnitt 4, nach dem Entschalen bis zu einem Alter von 7 Tagen im Feuchtlagerungskasten gelagert und danach bis zur Prüfung in einem Klima von 20 °C bei 65 % rel. Luftfeuchte aufbewahrt. Die Ergebnisse der Mörtelprüfungen sind der Tabelle 20 zu entnehmen.

Auf drei Wände der Versuchsserien I und II wurde beidseitig ein Kalk- bzw. Zementputz, $d = 1,5 \text{ cm}$, aufgetragen. Von der Versuchsserie III wurde eine Wand beidseitig mit einem Zementputz versehen. Zur Verbesserung der Haftgrundeigenschaften war auf den Mauerwerksoberflächen vorher ein Spritzbewurf aufgebracht worden.

Eine Zusammenstellung aller Varianten der Mauerwerkswände hinsichtlich Abmessungen, Ausgangsmaterialien sowie die ausgeführten Mauerwerksverbände ist der Tabelle 07 zu entnehmen.

3.2 Ergänzende Untersuchungen an Norm-Prüfkörpern zur Bestimmung der Materialkennwerte (Nebenversuche NV)

Wesentlicher Materialkennwert des Mauerwerks zur Beschreibung des Tragverhaltens ist sein Spannungs-Dehnungs-Verhältnis, das von Druckfestigkeit $\beta_{D,mw}$ und zugeordneter Bruchstauchung ϵ_{su} sowie Ausprägung eines plastischen Bereichs abhängt.

Rechnerische Ansätze zur Bestimmung der zentrischen Druckfestigkeit und des dazugehörigen E-Moduls sind in DIN 18 554 Teil 1 enthalten. Auf diesem Wege ermittelte Kennwerte können jedoch hier nur als Anhaltswerte für weitere Überlegungen herangezogen werden, da es sich um verallgemeinerte

Wand- Bezeichn.	Steinsorte	Mörtel- gruppe	Verband	Wandabmessungen $b_W / d / h_W$ [m]	Putz
I/1	Mz 12-1,6-(RF)	MG II	Blockverband	0,6 / 0,25 / 2,385	-
I/2	Mz 12-1,6-(RF)	MG II	Blockverband	0,6 / 0,25 / 2,385	-
I/3	Mz 12-1,6-(RF)	MG II	Blockverband	0,6 / 0,25 / 2,385	Kalk 2)
I/4	Mz 12-1,8-(RF)	MG II	Läuferverband	0,6 / 0,125 / 2,385	-
I/5	Mz 12-1,8-(RF)	MG II	Läuferverband	0,6 / 0,125 / 2,385	-
II/1	KS 20-1,6-2DF u. 3DF	MG I	Binderverband	0,615 / 0,24 / 2,375	Zementputz 1)
II/2	KS 20-1,6-2DF u. 3DF	MG I	Binderverband	0,615 / 0,24 / 2,375	-
II/3	KS 20-1,6-3DF	MG I	Läuferverband	0,165 / 0,175 / 2,375	-
II/4	KS 20-1,6-3DF	MG I	Läuferverband	1,24 / 0,175 / 2,375	
II/5	mußte aus Kostengründen entfallen				
II/6	HLz B 28-1,2-3DF	MG I	Läuferverband	0,165 / 0,175 / 2,375	
II/7	HLz B 28-1,2-2DF u. 3DF	MG I	Binderverband	1,24 / 0,24 / 2,375	
II/8	HLz B 28-1,2-3DF	MG I	Läuferverband	1,24 / 0,175 / 2,375	Kalkputz 2)
III/1	Mz 12-1,8-(RF)	MG I	Blockverband	3,0 / 0,25 / 2,0	-
III/2	Mz 20-1,8-(RF)	MG I	Blockverband	3,0 / 0,25 / 2,0	Zementputz 1)

1) Zementputz, Gruppe P III b gemäß Tabelle 3 DIN 18 550 Teil 2, Ausgabe Jan. 1985

2) Kalkputz, Gruppe P I b gemäß Tabelle 3 DIN 18 550 Teil 2, Ausgabe Jan. 1985

Tabelle 07: Mauerwerkswände der Hauptversuche

Werte unter Einschluß von Sicherheitszuschlägen handelt. Außerdem wird das Tragverhalten exzentrisch belasteten Mauerwerks hierdurch nicht berücksichtigt. Daher wurde die Prüfung von Norm-Prüfkörpern unter zentrischer und exzentrischer Belastung mit einer Lastausmitte von $e = d/6$ in das Versuchsprogramm mit aufgenommen. Die Abmessungen dieser Prüfkörper und der Versuchsablauf hinsichtlich Belastungsstufen und Belastungsgeschwindigkeit sollten sich hierbei an den Anforderungen von DIN 18 554 Teil 1 orientieren. Diese Nebenversuchskörper wurden entweder zusätzlich zu den Mauerwerkswänden der Hauptversuche unter Verwendung des gleichen Mörtels und Steinmaterials sowie unter Berücksichtigung gleicher Erhärtingsbedingungen aufgemauert oder aus den Restbeständen bereits geprüfter Wände entnommen.

Die Prüfungen waren nach den Bestimmungen der DIN 18 554 Teil 1 auszuführen, und zwar zeitlich parallel zu den Untersuchungen der Wände, so

daß jeder geschoßhohen Mauerwerkswand die Mittelwerte der mechanischen Kenngrößen Druckfestigkeit und E-Modul aus einer Serie von jeweils drei Norm-Körpern zuzuordnen sind.

Der Umfang der ergänzenden Nebenversuche ist der Tabelle 19 zu entnehmen. Als Bezeichnung wurde die der Hauptversuchskörper mit dem Zusatz N verwendet. Hierdurch wird eine direkte Zuordnung der Nebenversuchskörper zu den geschoßhohen Prüfwänden der Hauptversuche ermöglicht.

3.3 Ergänzende Untersuchungen an aus Bohrkernen hergestellten Quadern (Kleinprüfkörper KV)

Es ist praktisch nicht durchführbar, aus vorhandenem Mauerwerk Prüfkörper zur Bestimmung der Druckfestigkeit mit Abmessungen gemäß DIN 18 554 Teil 1 von z.B. $50 \times 75 \times 24 \text{ cm}^3$ zu entnehmen.

Hingegen bietet es sich an, aus Mauerwerk in horizontaler Richtung Bohrkern mit einem Durchmesser von 200 mm zu entnehmen und daraus Prüfkörper zur Ermittlung ihrer Materialeigenschaften zu schneiden. Die Prüfrichtung dieser Kleinprüfkörper (KV) kann somit der vertikalen Belastungsrichtung der vorhandenen Wände entsprechen. Inwieweit dieses sachlich richtige, aber umständliche Verfahren unabdingbar notwendig ist, bedarf noch einer Überprüfung: einfacher wäre, die Bohrkern in ihrer Achse unmittelbar auf Druckfestigkeit zu prüfen. Allerdings wäre dabei zu beachten, daß es fachgerecht ist, innere Stoßfugen mehrlagigen Mauerwerks nicht mit Mörtel zu verfüllen.

Durch vergleichende Prüfung von Kleinprüfkörpern und Norm-Prüfkörpern, deren Mauerwerksart, Mörtelzusammensetzung und Erhärtingsbedingungen identisch waren, sollten Umrechnungsfaktoren für die Druckfestigkeit ermittelt werden.

Bei der Untersuchung der Kleinprüfkörper auf Druckfestigkeit wurden hinsichtlich der äußeren Gestalt drei Typen geprüft, weil ihr Ausschnitt aus dem Mauerwerksverband abhängig ist von Stoß- und Lagerfugenverlauf an der

Bohrkernentnahmestelle der zu beurteilenden Wand. Es ergeben sich für die zu untersuchenden Kleinprüfkörper die in Bild 01 dargestellten unterschiedlichen Gestaltsmerkmale.

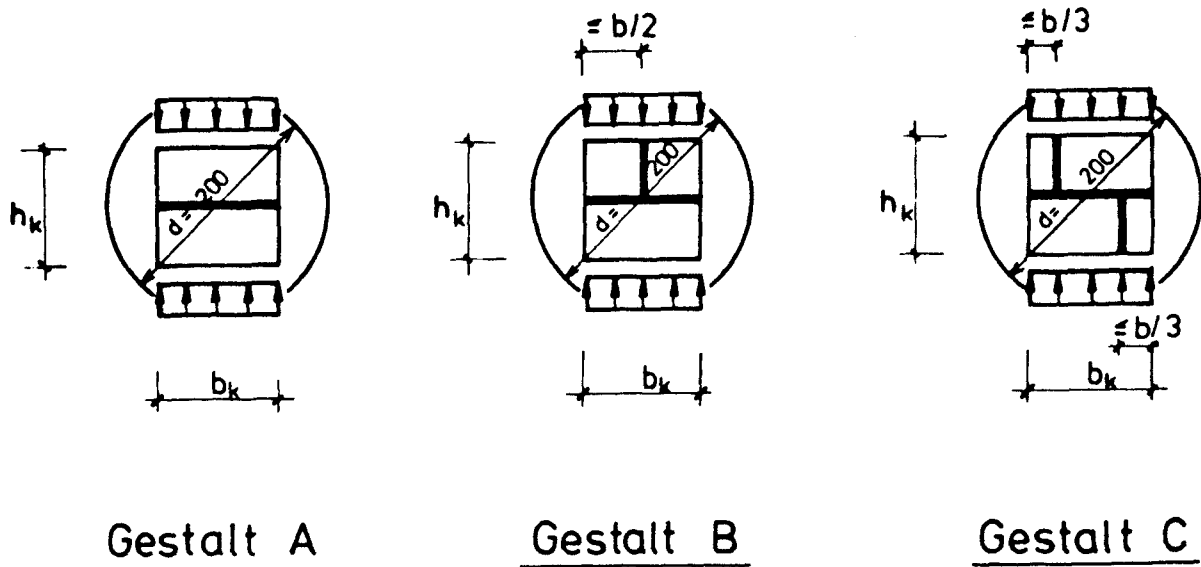


Bild 01: Kleinprüfkörper

Eine Zusammenstellung der aus den geprüften Wandstreifen der Hauptversuche entnommenen Bohrkerne ist der Tabelle 18 zu entnehmen. Entsprechend dem bereits oben erläuterten Bezeichnungsschema wird zur Kenntlichmachung der Kleinprüfkörper der Buchstabe K der verwendeten Wandnumerierung vorangestellt.

3.4 Beschreibung der Prüfeinrichtung für die Untersuchung raumhoher Mauerwerkswände

3.4.1 Allgemeines

Bei der Konzipierung der Prüfeinrichtung waren folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- Die Belastung der Mauerwerkswände im Prüfstand soll in vertikaler Richtung als Normalkraftbeanspruchung und horizontal, senkrecht zur Wandebene, als konstante Flächenlast eingeleitet werden. Die Normalkraft-

beanspruchung blieb während des ganzen Versuchs konstant, die Horizontalkraft wurde stufenweise gesteigert.

- Die Kopf- und Fußhalterungen der Versuchswände sollen eine gelenkige oder starre Lagerung der Wandenden ermöglichen.
- Es müssen Wände oder Wandstreifen unterschiedlicher Breite geprüft werden können. Dabei ist auch die Möglichkeit der Untersuchung eines zweiachsigen Lastabtrages zu berücksichtigen.
- Versuchswände mit einer Höhe bis zu 2,5 m sollen in die Versuchsanlage einbaubar sein.

Als Versuchseinrichtung wurde der Wandprüfstand der brandschutztechnischen Abteilung des Instituts genutzt. Dieser Prüfstand gestattet den Einbau von Wänden der beschriebenen Größe und die erforderliche Belastung in vertikaler Richtung mit zwei servo-hydraulischen Druckzylindern bis zu je 1000 kN bei einem maximalen Hub von 100 mm. Die Versuchswände wurden von unten - gegen ein festes Widerlager am Kopf des Wandprüfstandes - vertikal beansprucht. Die horizontale Druckbeanspruchung der Wände erfolgte so, daß die Ansichtsfläche der Zugbeanspruchung ausgesetzt war.

3.4.2 Untersuchung der einachsigen Biegetragfähigkeit

Zur horizontalen Belastung mit einer konstanten Flächenlast wurden Druckkissen aus Kunstkautschuk mit einer geringen Eigensteifigkeit verwendet. Die Abmessungen der Druckkissen betrugen im eingebauten aufgeblasenen Zustand je nach der Breite der zu prüfenden Mauerwerkswand 2,14 m x 0,6 m bzw. 1,25 m. Die Druckkissen waren auf einen Maximaldruck von 2,0 bar dimensioniert; die Dicke der Druckkissen betrug 40 mm. Sie wurden mit Druckluft aus Stahlflaschen gefüllt. Als horizontales Widerlager für die von den Luftkissen ausgeübte Druckbeanspruchung diente eine aus Eichenkanthölzern errichtete Holzwand, die von Stahlträgern IPB 260 in 62,5 cm Achsabstand gestützt wurde. Am oberen und unteren Ende eines jeden Stahlträgers war der Kopf- und Fußbereich der Prüfwand mittels zweier horizontaler Zugstangen aus Schraubenstahl 8.8 gemäß DIN 267, Durchmesser 22 bzw. 12 mm, mit der Auflagerplatte der Wand verbunden.

Die Bilder 18 bis 20 zeigen den konstruktiven Aufbau des Versuchsstandes für Wände der Versuchsserien I und II mit einachsigem Lastabtrag. Den oberen und unteren Abschluß einer Prüfwand bildeten Walzprofile [320 aus St 37. Der Zwischenraum zwischen Prüfwand und Profilschenkel wurde ausbetoniert, um eine Verschiebung der Wand im C-Profil zu verhindern. Ein Halbrundstahl am Kopf- und Fußpunkt über oder unter dem C-Profil gewährleistete an diesen Stellen eine gelenkige Lagerung.

Zur Erzielung einer Teileinspannung an der oberen und unteren Begrenzung der Versuchswand wurden die Halbrundstähle durch Flachstähle entsprechender Dicke ersetzt.

3.4.3 Untersuchung der zweiachsigen Biegetragfähigkeit

Zur Aufbringung des Horizontaldruckes wurden wiederum Druckkissen verwendet. Die zu prüfenden Wände waren 3,0 m breit, deshalb mußten 3 Luftkissen nebeneinander angeordnet werden. Als horizontales Widerlager der Kissen diente auch hier eine aus Eichenkanthölzern errichtete Holzwand. Da bei der Prüfung der 3 m langen Wände eine Durchlaufwirkung in horizontaler Richtung - unter Annäherung eines Seitenverhältnisses im Mittelbereich von 1:1 - simuliert werden sollte, wurde jeweils in einem Abstand von 0,5 m von den Wandstirnseiten eine zusätzliche vertikale Halterung durch anbetonierte IPB 100-Stahlprofile angebracht. Den oberen und unteren Abschluß der Prüfwände bildeten in [320-Stahlprofile einbetonierte Stahlbetonbalken, die jeweils einen drehsteifen Decken- bzw. Sohlanschluß nachbilden sollten. Die horizontale Halterung an Kopf- und Fußende der Prüfwand wurde durch DYWIDAG-Spannstangen erreicht, s. Bilder 21 und 22.

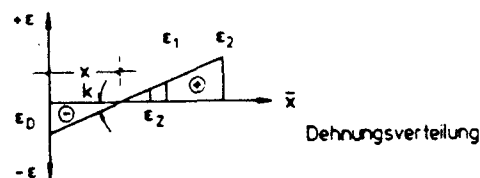
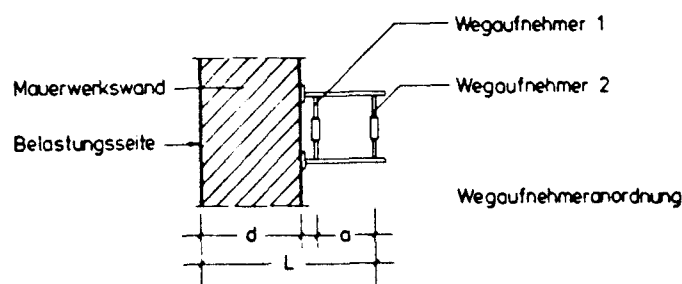
4.0 Versuchsdurchführung und Prüfergebnisse

4.1 Untersuchungen an geschoßhohen Wandprüfkörpern (Hauptversuche HV)

In jedem Versuch wurden folgende Meßgrößen je Laststufe ermittelt:

- Luftdruck im Druckkissen p_L (bar) über induktiven Druckaufnehmer
- Vertikale Belastung q_V (kN) durch Messung der Pressenkräfte
- Durchbiegung der Mauerwerkswand w_j (mm) über potentiometrische Rollenmeßgeräte
- Dehnungen auf der "Zugseite" der Prüfwand ε_i (‰) über potentiometrische Wegaufnehmer

Um bei der Versuchsauswertung die Druckzonenhöhe, Dehnung, Stauchung und Krümmung einer Querschnittsfläche bestimmen zu können, wurden über eine Haltekonstruktion an der Zugseite der Mauerwerkswand in unterschiedlichen Meßebenen jeweils 2 potentiometrische Wegaufnehmer hintereinander in einem Abstand $a = 16...18$ cm an der Wandoberfläche fixiert (Bild 02).



$$\varepsilon(\bar{x}) = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{a} (L - \bar{x}) + \varepsilon_2 \quad \text{Verzerrungsfunktion}$$

$$\varepsilon(\bar{x} = 0) = \varepsilon_D \quad \text{Druckstauchung}$$

$$\varepsilon(\bar{x} = d) = \varepsilon_2 \quad \text{Zugdehnung}$$

$$\varepsilon(\bar{x}) = 0: \quad 0 < x \leq d \quad \text{Druckzonenhöhe}$$

$$k = \varepsilon(\bar{x})' \quad \text{Krümmung}$$

$$k = -\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{a}$$

Bild 02: Ermittlung von Druckzonenkennwerten

Die Meßbasis für die Ermittlung der Dehnungen über die potentiometrischen Wegaufnehmer betrug je nach vorliegenden Steinformaten 14,5 bis 19,5 cm. Hierbei wurde mindestens über eine Lagerfuge hinweg gemessen.















Die Plazierung der verschiedenen Meßgeräte ist den Meßstellenbelegungsplänen der Bilder 23 bis 27 zu entnehmen.

Die Biegelinien der zu untersuchenden Versuchswände konnte mit Hilfe der in verschiedenen Wandhöhen gemessenen Einzelwerte der Durchbiegungen konstruiert werden. Die Bilder 28 bis 41 geben die Durchbiegungsverläufe der Mauerwerkswände der Versuchsserien I bis III wieder.

Die Krümmungen k_j (1/m) in unterschiedlichen Höhen der Mauerwerkswände wurden in der in Bild 02 beschriebenen Weise auf rechnerischem Weg ermittelt. Die Bilder 42 bis 55 zeigen den Krümmungsverlauf über die Höhe der jeweiligen Prüfwand während ausgewählter Laststufen. Die Veränderung der Wandkrümmung in Wandmitte verdeutlicht die allmähliche Ausprägung eines Gelenks durch Rißbildung in halber Wandhöhe. Die Bilder 49; 51; 54 und 55 zeigen den Krümmungsverlauf und die Gelenkbildung bei eingespannten Wänden.

Die Bilder 56 bis 67 zeigen den Verlauf der Druckzonenhöhe sowie die Dehnung und Stauchung des Mauerwerksquerschnittes der jeweiligen Prüfwände während ausgewählter Laststufen. Man erkennt, daß in den meisten Fällen die Druckzonenhöhe ein Drittel der Querschnittsdicke nicht unterschreitet.

In der Tabelle 08 sind die wichtigsten Versuchswerte der geprüften Mauerwerkswände zusammengefaßt. Hierbei bezieht sich der angegebene Wert der letzten Laststufe des Luftkissendruckes auf die tatsächliche Druckkissenhöhe von 2,14 m (siehe auch Bild 18), während die vertikale Belastung in eine in der Wandmittelfläche wirkenden Linienlast q_v (kN/m) umgerechnet wurde. Auf eine Wiedergabe sämtlicher Meßwerte der einzelnen Laststufen wird hier verzichtet. Alle Einzelwerte sind auf Datenträgern gespeichert und stehen für weiterführende Auswertungen zur Verfügung.

	I/1	I/2	I/3	I/4	I/5	II/1	II/2	II/3	II/4	II/6	II/7	II/8	III/1	III/2
Steinmaterial / MG	Mz/II	Mz/II	Mz/II	Mz/II	Mz/II	KS/I	KS/I	KS/I	KS/I	HLz/I	HLz/I	HLz/I	Mz/I	MZ/I
Wanddicke [cm]	25	25	25	12,5	12,5	24	24	17,5	17,5	17,5	24,0	17,5	25	25
Putz: beidseitig 1,5 cm	-	-	Kalk	-	-	Zement	-	-	-	-	-	Kalk	-	Zement
Lagerung am Kopf- und Fußpunkt														
Vertikallast q_v [kN/m] ¹⁾	357,62	529,44	527,53	193,67	273,82	401,22	346,75	410,76	295,81	382,33	270,57	465,75	140,0	66,6
1. Riß bei Luftkissen- druck p_L [bar]	0,21	-	0,50	0,03	0,06	0,20	0,20	0,40	0,15	0,40	-	0,12	-	0,55
Luftkissendruck p_L [bar] der letzten Laststufe ²⁾	0,4406	0,6051	0,6286	0,0729	0,1108	0,4952	0,3680	0,4803	0,196	0,4554	0,2914	0,1502	1,34	1,1
Mittendurchbiegung w [mm] der letzten Laststufe	7,17	11,66	11,43	9,31	8,88	5,35	12,27	18,96	12,44	15,80	11,89	12,11	19,75	9,55

¹⁾ in Wandmitte, während des Versuchs konstant

²⁾ bezogen auf die Anpreßfläche des Druckkissens

Tabelle 08: Wiedergabe der wichtigsten Meßergebnisse

4.2 Ergänzende Untersuchungen: Ermittlung von E-Modul und Druckfestigkeit des Mauerwerks

Zur Bestimmung der mechanischen Kennwerte E-Modul und Druckfestigkeit des verwendeten Mauerwerks waren Norm-Versuchskörper nach DIN 18 554 zu prüfen. Ihre äußeren Abmessungen wurden, wo es möglich war, streng an den Norm-Anforderungen orientiert. Die Schlankheit $\lambda = h/d$ der Versuchskörper soll hiernach zwischen 3 und 5 liegen, bzw. die Anzahl der Steinschichten soll mindestens 5 betragen. Vor allem durch die Mindestschichtzahl soll gewährleistet werden, daß ein genügend großer mittlerer Prüfkörperbereich ohne Einfluß der Querdehnungsbehinderung verbleibt.

Als Meßgeräte zur Ermittlung der Mauerwerksstauchungen dienten induktive Wegaufnehmer von denen jeweils drei an den beiden Seitenflächen der Nebenversuchskörper angebracht wurden. Die Meßbasis betrug 23 cm.

Die Steuerung der 6MN-Prüfmaschine sowie die Auswertung der Meßergebnisse erfolgte nach DIN 18 554, Abschnitt 3.3.2.2. Die Versuchskörper wurden zentrisch oder exzentrisch mit einer Lastausmitte von $d/6$ belastet. Die Laststeuerung erfolgte bei den Versuchskörpern der Versuchsserie I weggesteuert. Anfängliche Überlegungen zur Ermittlung des plastischen Bereiches der Spannungs-Dehnungslinie, die Versuchskörper der Serie II ebenfalls weggesteuert zu belasten, wurden nicht in die Tat umgesetzt, da die Größe der plastischen Verformungen sowohl stark abhängig ist von der Verformungsgeschwindigkeit als auch von der Art des Mauerwerks /1, 2, 3, 5 und 6/. Dies hat u.a. dazu geführt, daß DIN 1053, Teil 3 "Bewehrtes Mauerwerk" eine Bemessung von bewehrtem Mauerwerk in Anlehnung an das in DIN 1045, Abschnitt 17.2, enthaltene Materialgesetz zuläßt.

Werden Norm-Versuchskörper der oben beschriebenen Art exzentrisch belastet, so sind ihre Bruchstauchungen größer als bei zentrischer Belastung. Dies läßt sich z.B. durch die durch das Schwinden des Lagerfugenmörtels begünstigte Rotation des Mauerwerks erklären. Da die geprüften Wände neben der vertikalen Belastung auch durch ein Biegemoment infolge des Luftkis-

sendruckes beansprucht wurden, erschien ein Materialgesetz, das allein auf Grund einer zentrischen Belastung der Nebenversuchskörper zu formulieren war, nicht aussagekräftig genug.

In den Tabellen 9 und 10 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen bei zentrischer bzw. exzentrischer Belastung der Norm-Versuchskörper zusammengefaßt. Die Bilder 68 bis 83 zeigen den Verlauf der so ermittelten σ - ε -Linien im einzelnen. Der E-Modul wurde an den zentrisch geprüften Versuchskörpern als Sekantenmodul zwischen dem Ursprung und $\sigma = \beta_{D,mw}/3$ - bei erstmaliger Belastung - ermittelt.

Die Bruchspannung bei exzentrischer Belastung der Versuchskörper ergibt sich aus der Division der Bruchlast durch die belastete Fläche, wobei beim Auftreten von Dehnungen (Zugspannungen) an der weniger gedrückten Seite des Versuchskörpers die Druckzonenhöhe von der Probekörperdicke d auf das Maß x verringert wird. Somit sind folgende Druckfestigkeitswerte zu unterscheiden:

- | | |
|--------------------|---|
| β_s | Scheitelwert der Druckfestigkeit des Mauerwerks bei zentrischer Prüfung der Norm-Prüfkörper |
| $\beta_{sm}^{(d)}$ | Druckfestigkeit des Mauerwerks bei konstanter Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke d bei exzentrischer Belastung der Norm-Prüfkörper |
| $\beta_{sm}^{(x)}$ | Druckfestigkeit des Mauerwerks bei konstanter Spannungsverteilung über die Druckzonenhöhe x bei exzentrischer Belastung der Norm-Versuchskörper |

Versuchs-Nr.	Material	Wanddicke d [cm]	Druck- festigkeit β_s [MN/m ²]	E-Modul E_{mw} [MN/m ²]	Stauchung ϵ_{su} [%]
NI/1.1	Mz 12-1,6-(RF) MG II	25	7,40	5466,7	-2,40
NI/2.1		25	10,03	8000,0	-1,25
NI/2.2		25	9,26	8819,0	-1,50
NI/4.1		12,5	14,62	8050,0	-2,03
NI/4.2		12,5	16,01	10890,0	-1,96
NI/5.1		12,5	10,51	8750,0	-1,31
NII/2.1	KS 20-1,6 MG I	24	5,45	4325,4	-3,48
NII/2.2		24	6,98	4011,5	-3,60
NII/2.3		24	8,31	4073,5	-2,68
NII/3.1		17,5	7,71	4283,3	-2,66
NII/3.1		17,5	6,80	5396,8	-2,03
NII/7.1	HLz B 28-1,2 MG I	24	5,64	7520,0	-1,00
NII/7.2		24	5,40	9000,0	-1,04
NII/6.2		17,5	6,83	6909,0	-1,67
NII/6.3		17,5	6,13	7846,2	-1,41
NII/8.3		17,5	6,09	9666,67	-1,27
NIII/1.1	Mz 20-1,8-(RF) MG I	25	6,82	4328	-4,29
NIII/1.2		25	6,18	3434	-3,45
NIII/1.3		25	6,70	4213	-4,01
NIII/2.1	Mz 20-1,8-(RF) MG I	25	6,80	4425	-3,89
NIII/2.2		25	7,66	2969	-5,68
NIII/2.3		25	7,84	3486	-4,90

Tabelle 09: Ergebnisse von zentrisch belasteten Norm-Prüfkörpern

Versuchs-Nr.	Material	Wanddicke d [cm]	Druck- festigkeit $\beta_{sm}^{(d)}$ [MN/m ²]	Druck- festigkeit $\beta_{sm}^{(x)}$ [MN/m ²]	Stauchung ϵ_s [%]
NI/3.1	Mz 12-1,6-(RF) MG II	25	6,81	7,41	-2,36
NI/4.3		12,5	7,66	10,52	-4,67
NI/5.2		12,5	8,18	-	-1,82
NI/5.3		12,5	7,97	12,24	-6,84
NII/1.1	KS 20-1,6 MG I	24	4,61	-	-3,77
NII/2.1		24	4,13	-	-3,76
NII/2.2		24	5,49	5,72	-4,80
NII/2.3		24	4,52	-	-4,50
NII/3.3		17,5	5,64	5,89	-5,50
NII/6.1	HLz B 28-1,2 MG I	17,5	3,84	-	-2,80
NII/8.1		17,5	4,88	5,44	-2,73
NII/8.2		17,5	5,0	5,39	-3,13
NII/7.3		24	4,12	4,45	-1,71
NIII/1.4	Mz 12-1,8-(RF) MG I	25	4,41	4,99	-3,45
NIII/2.4	Mz 20-1,8-(RF) MG I	25	5,87	6,58	-6,02

Tabelle 10: Ergebnisse exzentrisch belasteter Norm-Prüfkörper

Bei dem Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Versuchskörpern gleichartigen Mauerwerks fällt auf, daß die Bruchstauchungen der exzentrisch belasteten Norm-Prüfkörper oftmals doppelt so hoch waren wie die der zentrisch geprüften Versuchskörper. Dies ist als Indiz dafür zu werten, daß bei einer wirklichkeitsnahen Formulierung eines allgemeinen Werkstoffgesetzes für Mauerwerk eine plastische Komponente zu berücksichtigen ist.

Das Verhältnis von Druckfestigkeit $\beta_{sm}^{(x)}$ infolge exzentrischer Belastung und Druckfestigkeit β_s bei zentrischer Belastung von Norm-Prüfkörpern beträgt etwa 0,83. Dieser Wert entspricht ungefähr dem Völligkeitsbeiwert $\alpha_R = 0,81$, welcher als Maß für die Ausnutzung der Biegedruckzone bei Betonquerschnitten unter Verwendung des Parabel-Rechteck-Diagramms nach DIN 1045, Abschnitt 17.2, bei voller Ausbildung des plastischen Bereichs

bis $\varepsilon_{b1} = 3,5 \text{ ‰}$ anzusehen ist; dies ist ein weiterer Hinweis darauf, daß sich in biegebeanspruchten Mauerwerksquerschnitten ähnliche Spannungs-Dehnungs-Beziehungen einstellen.

4.3 Ermittlung der Druckfestigkeit von Kleinversuchskörpern sowie eines Umrechnungsfaktors zu den Ergebnissen von Druckfestigkeitsprüfungen an Norm-Prüfkörpern

Je nach Form der verwendeten Mauersteine ergaben sich nach dem Schneiden der entnommenen Bohrkerne (20 cm Ø) unterschiedliche Abmessungen der Kleinprüfkörper. Bei Vollziegeln war es problemlos möglich, würfelförmige Probekörper aus den Bohrkernen zu schneiden. Bei Bohrkernen, die aus mit Grifflochsteinen hergestellten, 24 cm dicken Mauerwerkswänden entnommen wurden, mußte zwangsläufig der Quader als Prüfkörperform gewählt werden. Ein nochmaliges Teilen des Quaders zu einem Würfel hätte wegen des vorhandenen Griffloches dazu geführt, daß der Prüfkörper in Belastungsrichtung eine viel zu geringe Druckfläche aufgewiesen hätte.

Die Kantenlängen der Kleinprüfkörper wurden wie folgt bezeichnet (siehe Bild 01):

- h_k Höhe des Prüfkörpers in Beanspruchungsrichtung
- b_k Breite des Prüfkörpers parallel zur Lagerfugenrichtung
- d_k Abmessungen des Prüfkörpers in Richtung der Dicke des zu untersuchenden Mauerwerks

Es ergaben sich somit nach dem Schneiden der Bohrkerne im Idealfall Abmessungen der Kleinprüfkörper von

$$h_k/b_k = 12,5/12,5 \text{ cm (reichsformatige Mauersteine) bzw.}$$

$$h_k/b_k = 11,5/11,5 \text{ cm (Mauersteine in DIN-Format)}$$

Die Dicke d betrug bei Prüfkörpern aus Vollsteinen 12,5 cm und bei Grifflochsteinen 24 cm.

Erstaunlicherweise zerbrachen nur wenige Bohrkerne während des Schneidevorgangs, trotz des geringen Bindemittelanteils des Mauermörtels.

Nach dem Trocknen wurden die Kleinprüfkörper abgeglichen und in einer 600kN-Prüfmaschine einer Druckfestigkeitsprüfung unterzogen, wobei die Belastungsrichtung bei Kleinprüfkörpern und Mauerwerkswand übereinstimmte.

Die Prüfung erfolgte kraftgesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit gemäß DIN 105 "Mauerziegel", Teil 1, Abschnitt 6.4.2 von 0,5 N/mm²/sec.. Es wurde die Bruchlast festgestellt und die Druckfestigkeit der Probekörper ermittelt. Der Mittelwert der Einzeldruckfestigkeiten der Kleinprüfkörper sowie Standardabweichungen und Variationskoeffizienten als Stichprobenanalyse sind in Abhängigkeit von der Mauerwerksart und der Gestalt des Prüfkörpers in der Tabelle 21 zusammengefaßt.

Die Einzelwerte der Druckfestigkeit von Kleinprüfkörpern wurden zu den Mittelwerten der Druckfestigkeit von Norm-Versuchskörpern gleicher Mauerwerksart in Beziehung gesetzt. Es ist

$$\psi_i = \frac{\bar{B}_{s,NV}}{B_{si,KV}}$$

ψ_i Umrechnungsfaktor für die Druckfestigkeit

$\bar{B}_{s,NV}$ Mittelwert der Einzeldruckfestigkeit der nach DIN 18 554, Teil 1, geprüften Norm-Prüfkörper

$B_{si,KV}$ Einzelwert der Druckfestigkeit der Kleinprüfkörper

Zusätzlich wurden der Mittelwert $\bar{\psi}$ des Umrechnungsfaktors ψ_i mit dazugehörigem Variationskoeffizienten $V_{(\psi)}$ als Stichprobenanalyse ermittelt. Diese Rechnungen erfolgten zunächst getrennt für die unterschiedlichen Gestaltsmerkmale A bis C der einzelnen Versuchskörper. Um den Einfluß des Mauerwerksverbandes zu eliminieren, wurden anschließend die obigen stati-

stischen Auswertungen für alle Kleinversuchskörper einer Mauerwerksart durchgeführt.

Die Tabelle 11 faßt die Ergebnisse dieser Berechnungen wie folgt zusammen.

Bezeichnung	K I/3	K I/6	K I/6	K II/2	K II/7
Mauerwerk	Mz 12-1,6/II	Mz 12-1,6/II	Mz 12-1,6/II	KS 20-1,6/I	HLz B 28-1,2/I
$h_k / b_k / d_k$ [cm]	14,2/12,5/12,5	13,5/12,5/12,5	13,5/12,5/12,5	12/12/24	12/12/24
HV-Wand	I/3	I/6	I/6	II/2	II/7
Anzahl:					
Gestalt A	-	7	-	3	8
Gestalt B	-	-	-	3	3
Gestalt C	12	-	-	-	-
Alle	12	7	1	6	11
NV-Körper	N I/1 - I/2	N I/4 - I/5	N I/4 - I/5	N II/2 - II/3	N II/7
$\bar{B}_{s,NV}$ [N/mm ²]	8,90	14,31	14,31	7,05	5,29
Mittelwert $\bar{\psi}$ des Umrechnungsfaktors ψ_i					
Gestalt A	-	0,675	-	0,39	0,99
Gestalt B	-	-	-	0,44	0,88
Gestalt C	0,55	-	-	-	-
Alle	0,55	0,675	1,04	0,42	0,96
Variationskoeffizient $V_{(x)}$ zum Mittelwert $\bar{\psi}$					
Gestalt A	-	0,091	-	0,055	0,14
Gestalt B	-	-	-	0,076	0,063
Gestalt C	0,14	-	-	-	-
Alle	0,14	0,091	-	0,086	0,136

Tabelle 11: Umrechnungsfaktoren für Druckfestigkeitswerte von Mauerwerk

Um den Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf die Höhe des Druckfestigkeitswertes zu überprüfen, wurde 1 Kleinprüfkörper der Mauerwerkswand I/6 mit einer Belastungsgeschwindigkeit nach DIN 18 554 von

0,07 N/mm²/sec. geprüft. Der Druckfestigkeitswert von 23,67 N/mm² (Tabelle 21) liegt unwesentlich höher als der Mittelwert der mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,5 N/mm²/sec. geprüften Kleinprüfkörper.

Auch wurde versucht, den Einfluß der Querdehnungsbehinderung auf die Höhe des Druckfestigkeitswertes dadurch abzuschätzen, daß zwei Kleinversuchskörper der Mauerwerkswand I/6 übereinanderstehend geprüft wurden. Hierbei ergab sich annähernd die gleiche Druckfestigkeit wie bei Norm-Versuchskörpern.

Eine abschließende Beurteilung dieser Beziehung zwischen dem Druckfestigkeitswert nach DIN 18 554 und den Werten, die nach diesem Verfahren ermittelt worden sind, kann noch nicht vorgenommen werden, weil die Anzahl der bisher untersuchten Prüfkörper noch zu gering ist. Allerdings ist festzustellen, daß die Streuung der an den Kleinprüfkörpern ermittelten Druckfestigkeitswerte nicht sehr erheblich ist. Die Größe der Variationskoeffizienten $V_{(x)}$ für die Umrechnungsfaktoren ψ_i liegt zwischen 8,6 % und 14 %, so daß eine Anwendung dieses Verfahrens für die Praxis in Frage kommen dürfte.

5.0 Rechnerische Überprüfung der Versuchsergebnisse an raumhohen Wänden

5.1 Statische Systeme und Lastverteilung der Horizontalbeanspruchung

Mit Ausnahme der Versuchswände II/3 und II/6 liegt bei allen anderen einachsiger beanspruchten Wandprüfkörpern eine gelenkige Lagerung der Kopf- und Fußenden vor. Bei der rechnerischen Überprüfung der Versuchsergebnisse ist daher ein einfeldriges, beidseitig gelenkig gelagertes Stabwerk zu betrachten, das durch eine Normalkraft und durch eine gleichstreckenförmige Querlast beansprucht wird.

Vor der Durchführung der Hauptversuche II/3 und II/6 war die Halbrundleiste am Gelenkpunkt der Mauerwerkswände entfernt und durch einen Flachstahl ersetzt worden (Bild 19). Daher konnte sich hier ein Randmoment und somit eine Einspannwirkung ausbilden. Dies wird im folgenden durch die Anordnung einer Drehfeder am Kopf- und Fußpunkt dargestellt.

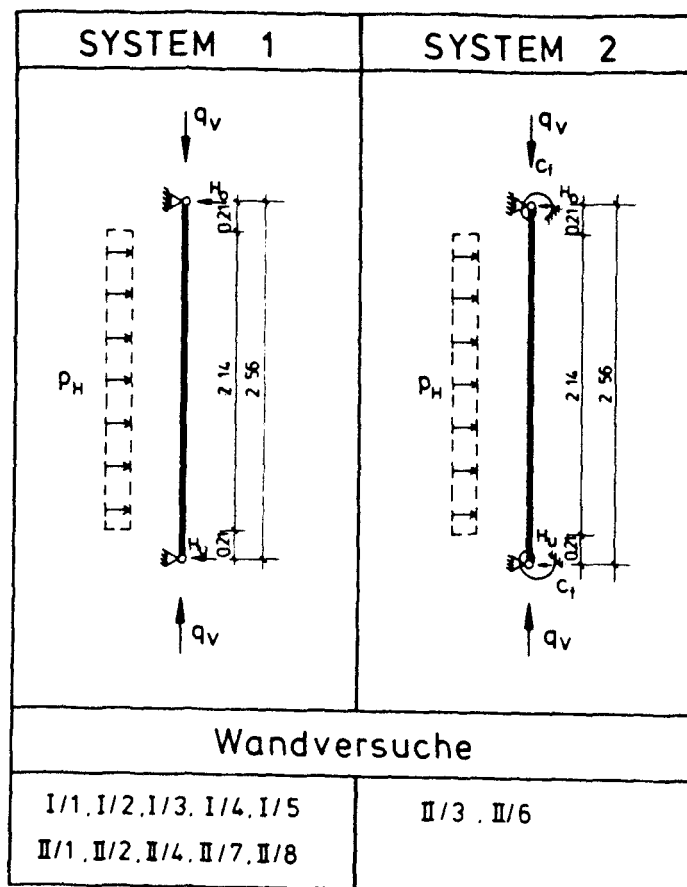


Bild 03: Statische Ersatzsysteme und Zuordnung der einachsiger beanspruchten Versuchswände

Für die kreuzweise biegebeanspruchten Versuchswände III/1 und III/2 wird das im Bild 04 dargestellte Ersatzsystem gewählt: Es ist von einer Einspannung ihrer Kopf- und Fußenden auszugehen, da die Drehsteifigkeit des Lastverteilungsbalkens größer ist als die Biegesteifigkeit der Versuchswände kurz unter- bzw. oberhalb der Betonbalken. Die jeweils in einem Abstand von 0,5 m vom seitlichen Ende der Wände angebrachten vertikalen Auflagerungen ermöglichen an diesen Stellen eine Durchlaufwirkung, so daß hier Stützmomente zu erwarten sind.

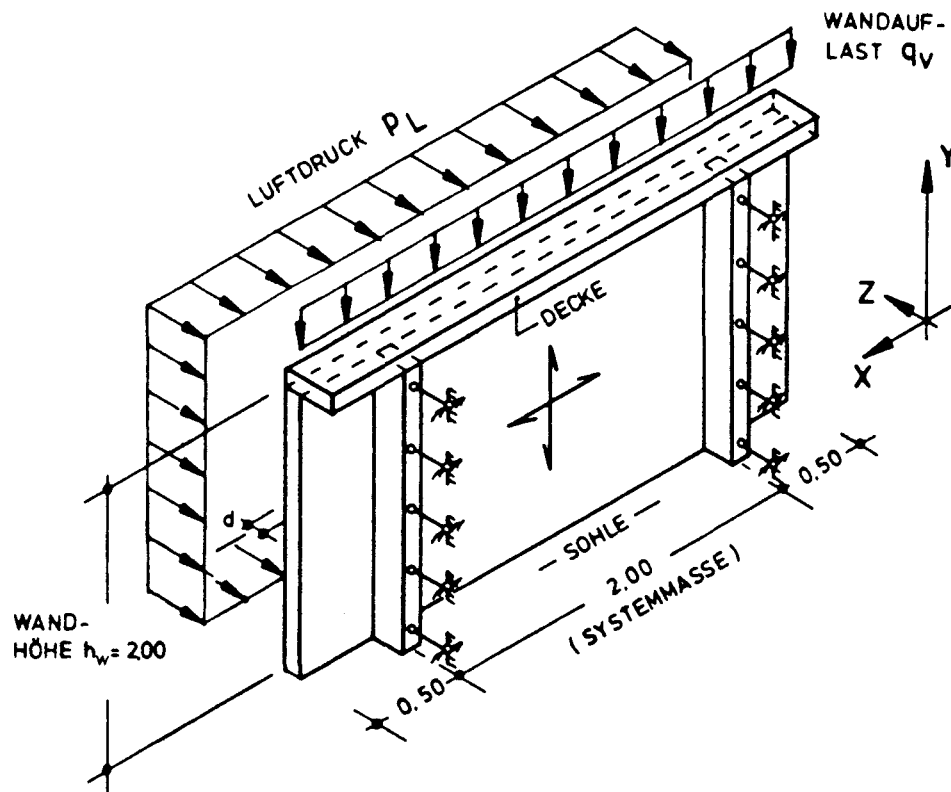


Bild 04: Statisches System kreuzweise biegebeanspruchter Mauerwerkswände

In den Bildern 03 und 04 bedeuten:

- q_v Vertikale Linienlast am Kopf- und Fußpunkt der Versuchswand unter Berücksichtigung des Wandeigengewichtes (kN/m)
- p_H Horizontale, gleichmäßig verteilte Belastung der Versuchswand nach Umrechnung des Luftkissendruckes p_L und der Luftkissenbreite b_L auf die Breite b_W der Versuchswand

$$p_H = p_L \cdot 10^2 \cdot \frac{b_K}{b_W} \approx 1,0 \approx 10^2 p_L \quad (\text{kN/m}^2)$$

5.2 Ermittlung der Schnittgrößen

5.2.1 Tragmodell

Bauteile, deren Materialien keine Zugfestigkeit besitzen, sind nur dann in der Lage, Biegebeanspruchungen aufzunehmen, wenn sie zusätzlich durch Druckkräfte beansprucht werden oder auf Grund ihrer Lagerung im Stande sind, einen druckbogenartigen Lastabtrag zu gewährleisten. Mauerwerkswände können nur dann die durch eine Horizontallast hervorgerufene Biegebeanspruchung ertragen, wenn sie zusätzlich durch eine Wandnormalkraft beansprucht werden. Die Biegezugfestigkeit des Mauerwerks ist sehr gering und als stark streuend anzusehen. Sie wird daher bei den künftigen Betrachtungen an einachsigt lastabtragenden Wänden nicht berücksichtigt.

Unter horizontaler Belastung biegt sich die zu untersuchende Wand durch. Wie in /1/ beschrieben, hat das Mauerwerk durch das Klaffen der Lagerfugen das Bestreben, sich in vertikaler Richtung zu dehnen. Diese Verformung wird jedoch durch die in senkrechter Richtung ein unverschiebliches Lager bildenden Kopf- und Fußhalterungen verhindert. Die dort angreifenden vertikalen Normalkräfte werden über einen sich im Mauerwerk einstellenden Druckbogen abgetragen. Das System bleibt so lange im Gleichgewicht, wie die Größe der Normalkraft multipliziert mit dem sich einstellenden Druckbogenstich f in der Lage ist, das äußere Biegemoment infolge horizontaler Belastung auszugleichen. Dies in /1/ schon einmal erläuterte Tragmodell wird zum besseren Verständnis des Gesamtzusammenhanges hier noch einmal wiedergegeben.

Bild 05 zeigt die Belastung und den qualitativen Schnittgrößenverlauf einer gelenkig gelagerten Mauerwerkswand. Druckbogen und Druckbogenstich f sind hier in einem Schnittbild mit eingezeichnet.

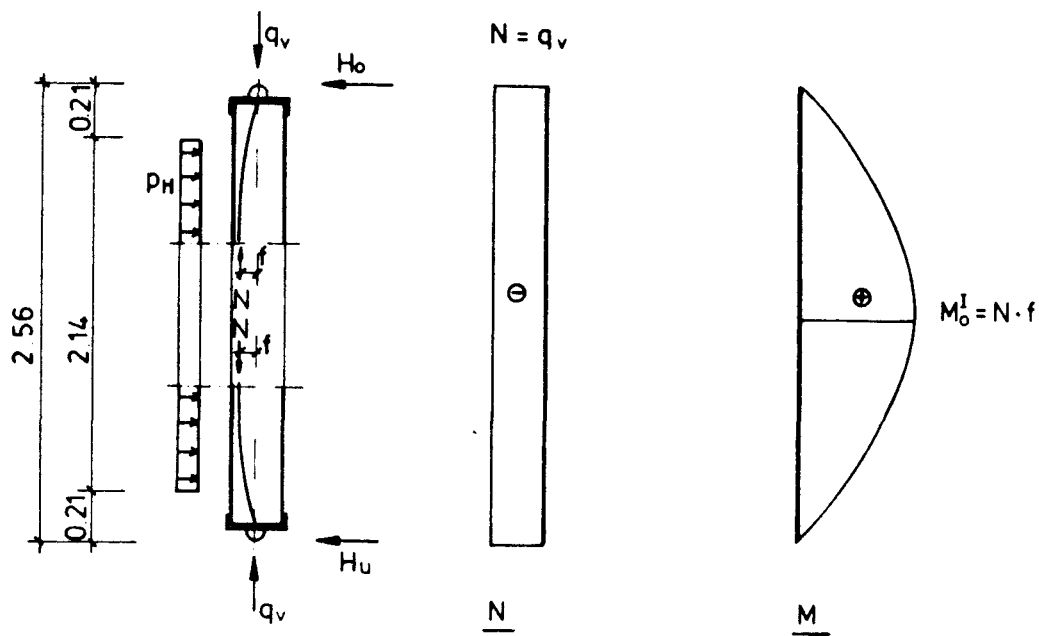


Bild 05: Belastung und qualitativer Schnittgrößenverlauf am statisch bestimmten unverformten System

Die Einspannwirkung der bei den Versuchen II/3 und II/6 in die Halterungen des Kopf- und Fußpunktes eingebauten Flachstahlleisten (Bild 19) bewirkt eine Lastausmitte e_s , wodurch ein Stützmoment an dieser Stelle hervorgerufen wird. Der Druckbogenstich f wird dadurch um diese zusätzliche Normalkraftausmitte e_s vergrößert, so daß sich hierdurch die Aufnahme eines höheren Horizontaldruckes erklären läßt. Bild 06 gibt diesen Sachverhalt zusammenfassend wieder.

In den Bildern 05, 06 und 07 bedeuten:

f	Druckbogenstich
e_s ; e_f	Normalkraftausmitten
p_H ; H	Horizontalbeanspruchung
q_v	vertikale Belastung
N	Normalkraft
M ; M_s ; M_f ; M_0^I	Biegemomente
S ; S_v ; S_H	Stabkräfte

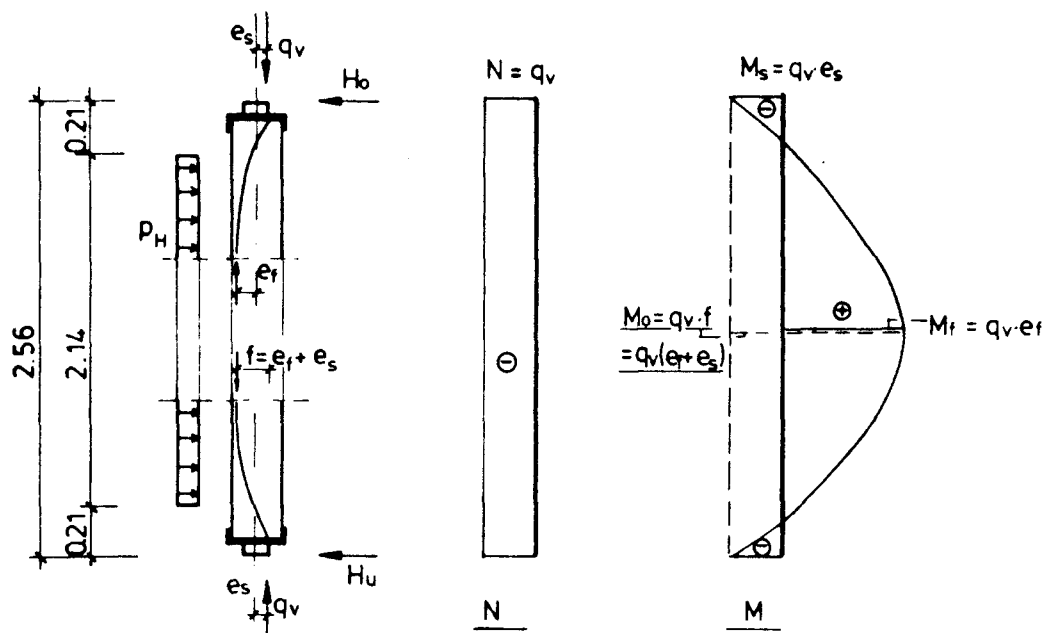


Bild 06: Belastung und qualitativer Schnittgrößenverlauf am unverformten Tragsystem mit Kopf- und Fußbeanspruchungen

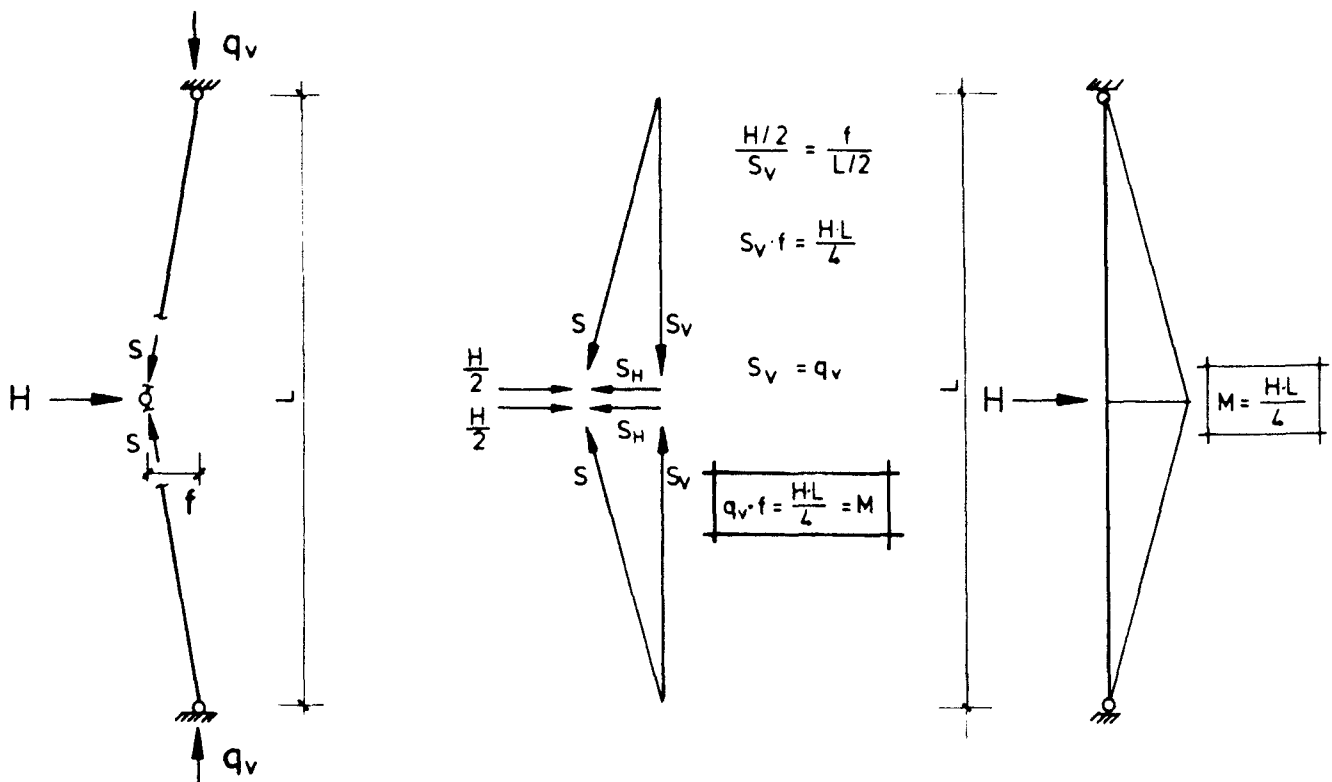


Bild 07: Vereinfachtes Tragmodell bei gelenkiger Lagerung

Das Tragverhalten von gemauerten Wänden kann auch durch ein Dreigelenkssystem erläutert werden, hier der Einfachheit halber durch eine Einzellast H horizontal und durch eine Vertikallast q_v beansprucht wird (s. Bild 07). Es wird deutlich, daß die aufnehmbare horizontale Beanspruchung der Wand bzw. das sich einstellende Traglastmoment von der Größe der Normalkraft und dem Druckbogenstich f abhängig ist. Wie in /1/ erläutert, ist der Stich f abhängig von der sich einstellenden Spannungsverteilung in der Druckzone des betrachteten Mauerwerksquerschnittes. Rechnerisch läßt sich dies durch die Einführung eines Völligkeitsbeiwertes α_R der Druckspannungsverteilung ausdrücken. Der Zusammenhang zwischen äußerer Belastung bzw. den daraus resultierenden äußeren Schnittgrößen und den das Gleichgewicht bildenden inneren Kräften am unverformten System ist Bild 08 zu entnehmen:

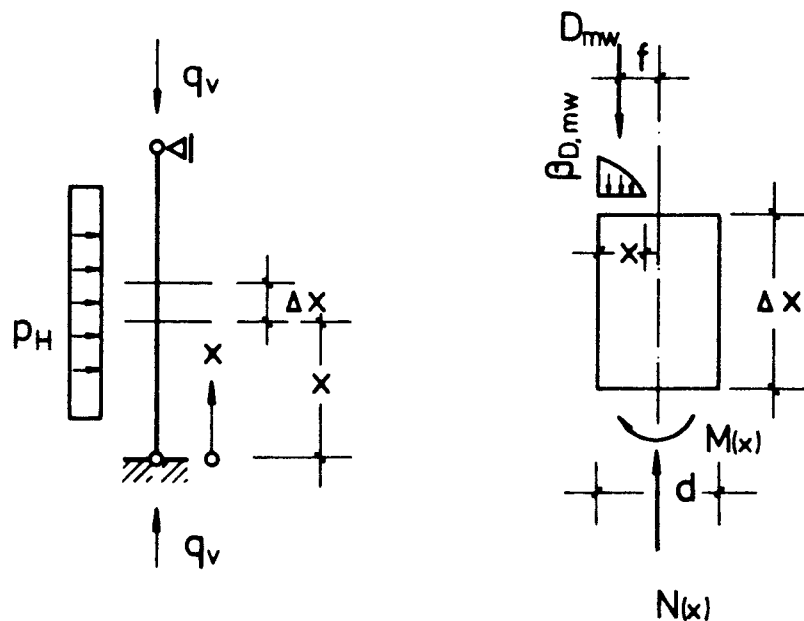


Bild 08: Äußere Schnittgrößen und innere Kräfte einer durch Biegung und Normalkraft beanspruchten Mauerwerkswand

Äußere Schnittgrößen an der Stelle x :

$$N(x) = -q_v$$

$$M(x) = f(p_H) = M_0^I$$

An einem endlichen, aus der Mauerwerkswand herausgeschnittenen Teilstück Δx können unter Zuhilfenahme der Gleichgewichtsbedingungen folgende Gleichungen angegeben werden:

$$\begin{aligned}\sum K_x &= 0 & N(x) &= D_{mw} \\ N(x) &= \alpha_R \cdot b \cdot x \cdot \beta_{D,mw} & (1)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M(x) &= 0 & M(x) &= D_{mw} \cdot f \\ M(x) &= M_0^I & (2)\end{aligned}$$

Hierin bedeuten:

α_R Völligkeitsbeiwert der Mauerwerksdruckzone

b Breite der Mauerwerksdruckzone (= Bauteilbreite)

x Druckzonenhöhe

$\beta_{D,mw}$ Scheitelwert der Druckfestigkeit des Mauerwerks

M_0^I Biegemoment aus äußerer Belastung am unverformten System

Durch Einsetzen der Gleichung (1) in (2) und Ersetzen des äußeren Biegemoments $M(x)$ durch $q_v \cdot e$ kann die Größe des Druckbogenstiches f wie folgt ermittelt werden:

$$M_0^I = \alpha_R \cdot b \cdot x \cdot \beta_{D,mw} \cdot f \quad (3)$$

$$f = \frac{M_0^I}{\alpha_R \cdot b \cdot x \cdot \beta_{D,mw}} \quad \text{für } e \leq d/2 \quad (4)$$

Soll zusätzlich die Ausbiegung des Systems in die Gleichgewichtsbetrachtungen mit einbezogen werden (Theorie 2. Ordnung), verringert sich das aufnehmbare Traglastmoment in dem Maße, wie der um die Schwerachse des Mauerwerksquerschnittes wirkende Hebelarm der Druckkraft D_{mw} durch die Verringerung des Druckbogenstiches f um die Durchbiegung w vermindert wird. Beispielhaft für eine statisch bestimmt gelagerte Wand ist Bild 09 zu entnehmen, daß zur Bestimmung des Traglastmomentes $M_0^{II,u}$ der Verformungseinfluß $\Delta M^{II} = q_v \cdot w$ rechnerisch zu berücksichtigen ist. Das sich während des Bruches bildende äußere Moment $M(x)$ ist für die weiteren Betrachtungen einem Traglastmoment $M_{0,u}^{II}$ nach Theorie II. Ordnung gleichzusetzen (Bild 09), also:

$$\text{also } M_0^{II} = M_0^I + q_v \cdot w$$

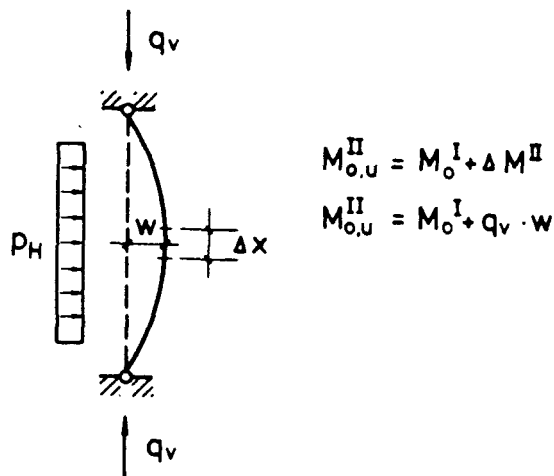


Bild 09: Traglastmoment $M_{o,u}^{II}$ infolge äußerer Belastung am verformten System

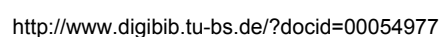
Wird das Traglastmoment $M_{o,u}^{II}$ in die Gleichung (3) eingesetzt, erhält man

$$\begin{aligned}
 M_o^I + q_v \cdot w &= \alpha_R \cdot b \cdot x \cdot B_{D,mw} \cdot f \\
 q_v &= -N(x) = D_{mw} = \alpha_R \cdot b \cdot x \cdot B_{D,mw} \\
 M_o^I &= \alpha_R \cdot b \cdot x \cdot B_{D,mw} (f - w)
 \end{aligned} \tag{5}$$

Man erkennt, daß die Durchbiegung w für die Ermittlung einer äußeren aufnehmbaren horizontalen Belastung von entscheidender Bedeutung ist. Dieser Sachverhalt ist von anderen Bemessungsvorschriften her bekannt, und es stellt sich die Frage, in welchen Fällen eine Berücksichtigung der Verformung notwendig wird. Dies soll im nächsten Abschnitt 5.2.2 erläutert werden.

Über Möglichkeiten, den Druckbogenstich überschläglich in Abhängigkeit der Spannungsverteilung in der Druckzone ermitteln zu können, ist bereits in /1/ berichtet worden.

Die Berücksichtigung einer Putzschicht auf der Druckseite einer Mauerwerkswand kann dadurch vorgenommen werden, indem man ihr, ähnlich einer "Druckbewehrung", einen Teil der Biegedruckkraft des Mauerwerks zuweist und diesen Anteil in die Gleichgewichtsbetrachtungen mit einbezieht (**Bild 10**). Die Mitwirkung einer Putzschicht als zusätzliches Zugglied soll in diesem Zusammenhang nicht weiter betrachtet werden.



Durch die Berücksichtigung einer Putzschicht wird also das aufnehmbare Biegemoment $M(x) = M_0^I$ einer horizontal belasteten Mauerwerkswand vergrößert.

5.2.2 Zusammenstellung der Schnittgrößen von einachsig lastabtragenden Versuchswänden

In der Tabelle 12 sind die aus den Meßwerten für

- Luftkissendruck im Bruchzustand p_L
- Wandauflast bzw. Normalkraft N_U in der Prüfwand
- maximale Durchbiegung im Bruchzustand $\max w$

zu ermittelnden maximalen Schnittgrößen nach Theorie I. und II. Ordnung aus allen Versuchen der Prüfserien I und II zusammengestellt.

Versuch	Mauerwerk / Mörtelgruppe	Putz ¹⁾	Lagerung	d [cm]	h_K/d	p_L [bar]	$\max w$ [mm]	N_U [kN/m]	M_F^I [kNm/m]	$M_0^I/M_s^{3)}$ [kNm/m]	M_F^{II} [kNm/m]	$\alpha = M_F^{II}/M_F^I$
I/1	Mz 12-1,6-(RF) MG II	-		25	10,2	0,4406	7,17	357,62	35,12	-	37,69	1,07
I/2		-		25	10,2	0,6050	11,66	529,44	48,23	-	54,40	1,13
I 3		Kalkputz		25	10,2	0,6286	11,43	316,72	50,11	-	53,15	1,06
I/4		-		12,5	20,5	0,0729	9,31	193,67	5,81	-	7,61	1,31
I/5		-		12,5	20,5	0,1108	8,87	273,82	8,83	-	11,26	1,28
II/1	KS 20-1,6 MG I	Zementputz		24	10,7	0,4952	5,35	401,22	39,48	-	41,62	1,05
II/2		-		24	10,7	0,3680	12,27	346,7	29,34	-	33,59	1,14
II/3		-		17,5	11,7 ²⁾	0,4803	18,96	410,8	17,69	38,23 / -20,54	25,48	1,44
II/4		-		17,5	14,6	0,1960	12,44	295,8	15,63	-	19,30	1,24
II/6	HLz B 28-1,2 MG I	-		17,5	11,7 ²⁾	0,4554	15,71	382,3	17,19	36,30 / -19,1	23,20	1,35
II/7		-		24	10,7	0,2914	11,9	270,6	23,23	-	26,45	1,14
II/8		Kalkputz		17,5	14,6	0,1502	12,11	465,75	11,99	-	17,63	1,47

¹⁾ Putzschichtdicke je Seite: 1,5 cm

²⁾ $h_K \approx 0,80 h$ trotz Teileinspannung

³⁾ nur bei Versuch II/3 und II/6

h_K : $h_K = B \cdot h \approx$ Ersatzstablänge zur Berücksichtigung des Knickens

d : Wanddicke

h_K/d : Schlankheit der Prüfwände

p_L : Luftdruck im Bruchzustand, gemessen

$\max w$: maximale Durchbiegung im Bruchzustand, gemessen

N_U : Normalkraft in der Versuchswand im Bruchzustand

M_F^I : Feldmoment nach Theorie I. Ordnung im Bruchzustand

M_F^{II} : Feldmoment nach Theorie II. Ordnung im Bruchzustand

α : Vergrößerungsfaktor des Feldmoments infolge des Verformungseinflusses nach Theorie II. Ordnung

Tabelle 12: Aufnehmbare Schnittgrößen der Mauerwerkswände der Versuchsserien I und II

Die Rechenansätze zur Ermittlung der Schnittgrößen der geprüften Wände werden im folgenden formelmäßig wiedergegeben.

Ausgehend von der Systemskizze 1 im Bild 03 des Abschnittes 5.1 betragen die horizontalen Lagerkräfte H_0 und H_u für

$$\begin{aligned} p_H &= 100 p_L && (\text{kN/m}^2) \\ H_u = H_0 &= 1,07 \cdot p_H && (\text{kN/m}) \end{aligned}$$

Somit ergibt sich hieraus für das gelenkig gelagerte System 1 ein Feldmoment nach Theorie I. Ordnung zu

$$M_F^I = 0,7972 p_H \quad (\text{kNm/m})$$

Die Normalkraft N_u , welche in halber Höhe der Prüfwand wirkend anzunehmen ist, wurde aus den von unten wirkenden Pressenkräften unter Berücksichtigung des Eigengewichtes der Wand und der ebenfalls mit anzuhebenden Stahlteile des Versuchsstandes ermittelt. Das Zusatzmoment nach Theorie II. Ordnung

$$\Delta M^{II} = N_u \cdot w$$

ist dem Biegemoment M_F^I zu addieren:

$$M^{II} = M_F^I + \Delta M^{II}$$

Zur Verdeutlichung dieses Verformungseinflusses aus der Theorie II. Ordnung wurde ein Vergrößerungsfaktor

$$\alpha = M_F^{II} / M_F^I$$

mit in die Tabelle 12 aufgenommen. Erwartungsgemäß steigt dieser Faktor mit zunehmender Schlankheit h_K/d der Versuchswände. Dieser Sachverhalt ist aus Stabilitätsuntersuchungen von Bauteilen aus anderen Baustoffen bekannt. Er soll daher die Notwendigkeit unterstreichen, den Verformungseinfluß bei der Bemessung von Mauerwerkswänden im bruchnahen Bereich zu berücksichtigen.

Für die Prüfwände II/3 und II/6 wird das statische System der Skizze 2 in Bild 03 des Abschnittes 5.1 eingeführt. Hierbei ist das Stützmoment M_s in der Kopf- und Fußbeanspruchung durch eine Ausmitte

$$e_s = M_s / q_v$$

bestimmt. Dem Betrage nach kann die Ausmitte e_s maximal den halben Wert der Breite des in der Versuchsanlage eingebauten Flachstahls $\varnothing 100 \times 50$ annehmen (siehe Detail Fußbeanspruchung des Bildes 19). Eine größere Ausmitte als $e_s = 5 \text{ cm}$ kann nicht entstehen, da sonst kein Gleichgewichtszustand erreicht werden kann. Somit beträgt das Feldmoment M_F^I nach Theorie I. Ordnung

$$M_F^I = -q_v \cdot e_s + M_0$$

mit

$$M_0^I = p_H \cdot 0,7972$$

als Biegemoment am statisch bestimmten Ersatzsystem. Zur Bestimmung des Einflusses aus der Verformung des Systems ist dem Feldmoment M_F^I das Zusatzmoment nach Theorie 2. Ordnung

$$\Delta M^{II} = N_u \cdot \max w$$

hinzuzuaddieren.

Schubbruchversagen wurde bei keiner geprüften Versuchswand festgestellt. Schubnachweise nach DIN 1053 Teil 2, Abschnitt 7.5, ergaben unter Berücksichtigung der Vertikallast $q_v = -N_u$:

$$\text{vorh. } \tau_u < \tau \cdot \gamma$$

5.2.3 Interaktion zwischen Biegemoment und Normalkraft

Die während der Versuche aufgetretenen Bruchschnittgrößen der Mauerwerkswände lassen sich auch auf andere Weise darstellen. Hierzu dienen Interaktionsdiagramme zwischen den normierten Biegemomenten m_u und Normalkräften n_u für den Bruchzustand. Diese wurden für drei unterschiedliche Materialgesetze zwischen Druckspannung und Stauchung erstellt und hierin die normierten Bruchschnittgrößen der Versuchswände eingetragen (Bild 11).

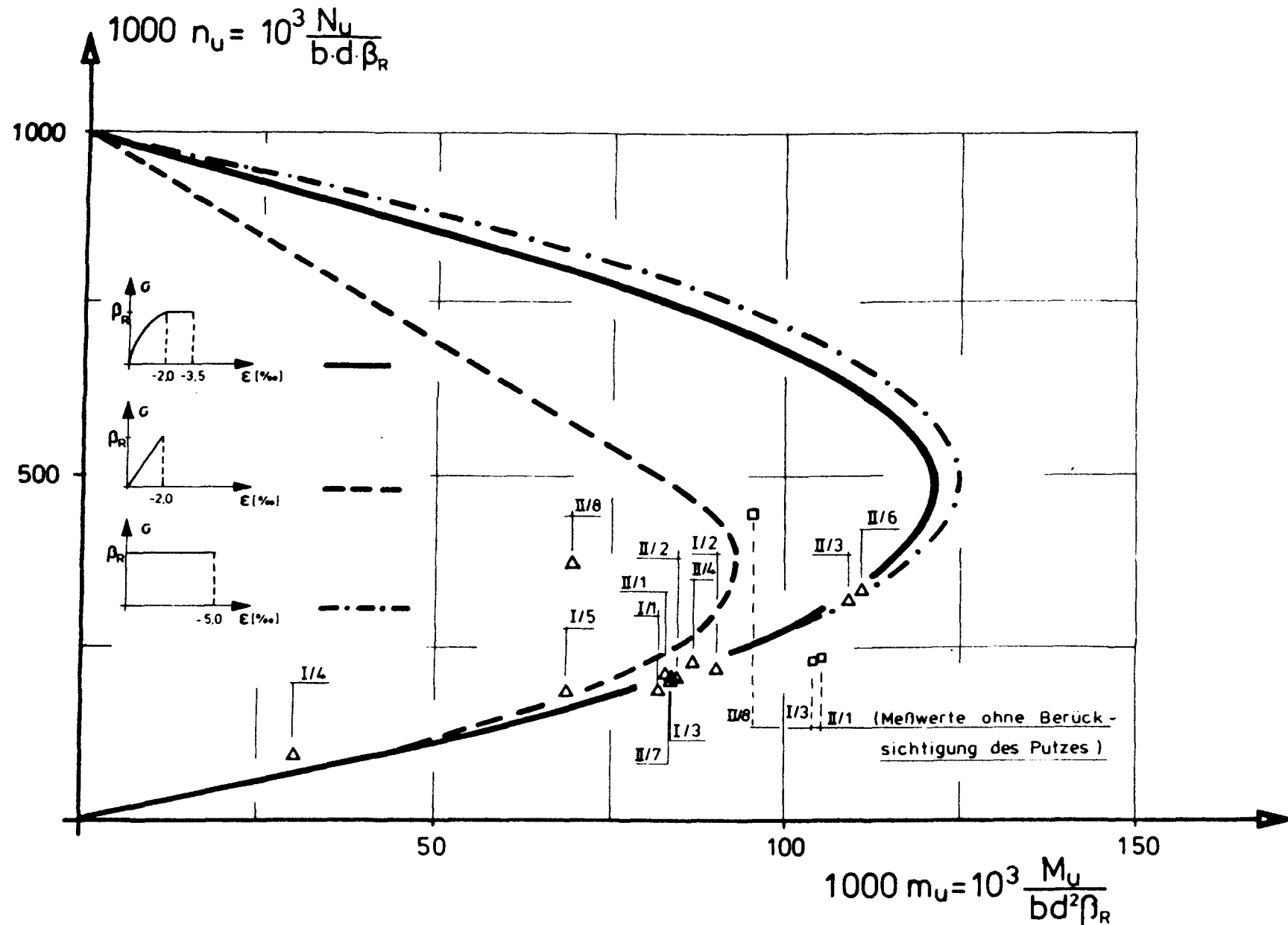


Bild 11: Interaktionsdiagramme

Es zeigt sich nun, mit welcher Form der Spannungs-Dehnungs Linie in einer Interaktionsbeziehung die beste Übereinstimmung mit den normierten Bruchschnittgrößen der geprüften Mauerwerkswände erzielt wird. Dabei fällt auf, daß sich unterhalb des Balance-Points in einem Bereich geringerer n_u -Werte die Interaktionslinien angleichen. Dies bedeutet, daß bei geringer Vertikalbelastung einer Mauerwerkswand größerer Druckfestigkeit die Art des zugrunde gelegten Werkstoffgesetzes für die Ermittlung der Bruchschnittgrößen M_u und N_u von untergeordneter Bedeutung ist. Dies allein darf aber nicht als ein Indiz dafür angesehen werden, grundsätzlich bei der Wahl eines Werkstoffgesetzes auf einen plastischen Anteil für n_u - m_u -Kombinationen unterhalb des Balance-Points zu verzichten. Vielmehr wird deutlich, daß die Verwendung eines Werkstoffgesetzes nach DIN 1045, Abschnitt 17.2 (durchgezogene Linie), für die Darstellung des Zusammenhanges zwischen Druck und Biegung die größte Annäherung an die aus den Meßwerten errechneten Bruchschnittgrößen ermöglicht.

In dem Bild 11 sind jeweils zwei Wertepaare m_u/n_u für die beidseitig geputzten Mauerwerkswände I/3, II/1 und II/8 enthalten. Die zuvor berechneten bezogenen Bruchschnittgrößen n_u und m_u wurden jeweils mit oder ohne Berücksichtigung der Putzschichten von $2 \times 1,5$ cm beim Ansatz der Gesamtdicke d der Wand ermittelt. Bei der Berücksichtigung der Putzschichtdicken liegen die Bruchschnittgrößen n_u und m_u deutlich näher an den Interaktionslinien. Dies deutet darauf hin, daß der Putz bei der Ermittlung der Biegetragfähigkeit einer Mauerwerkswand zu berücksichtigen ist.

5.3 Rechnerische Überprüfung der gemessenen Durchbiegungen

5.3.1 Allgemeines

Bei der nachträglichen Ermittlung des Bruchmomentes wurde die Mittendurchbiegung in die Gleichgewichtsbetrachtungen mit einbezogen und somit eine Rechnung nach Theorie II. Ordnung durchgeführt.

Für die Bemessung vertikal und horizontal belasteter Mauerwerkswände kommt der richtigen Erfassung der Durchbiegung insofern eine besondere

Bedeutung zu, als durch die Berücksichtigung eines zu groß ermittelten Zusatzmoments nach Theorie II. Ordnung

$$\Delta M_{II}^I = N_u \cdot w_{\max}$$

die Tragfähigkeit der Wand unterschätzt wird. Ermittelt man hingegen den Wert der Mittendurchbiegung als zu gering, wird ausgehend von dem Bruchmoment M_u das Biegemoment aus Theorie I. Ordnung

$$M_0^I = M_u - \Delta M_{II}^I$$

und damit die aufnehmbare Horizontalbeanspruchung zu hoch eingeschätzt.

Eine zutreffende Berechnung der Mittendurchbiegung ist allerdings mit einigen Schwierigkeiten verbunden, da in einem Rechenansatz nicht nur eine geometrische, sondern auch die physikalische Nichtlinearität des Baustoffes Mauerwerk zu berücksichtigen ist.

5.3.2 Erläuterung des verwendeten Rechenverfahrens

Die rechnerische Überprüfung der gemessenen Durchbiegungen wurde mit Hilfe eines PC-lauffähigen Computerprogramms durchgeführt, welches den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Biegemoment und Krümmung hinreichend genau berücksichtigt. Dadurch konnte eine nichtlineare Spannungsdehnungslinie sowie das Aufreißen des Querschnittes im Bereich der Zugzone in die Berechnung mit einbezogen werden.

Die numerische Rechnung beruhte auf dem Reduktionsverfahren, mit dessen Hilfe bei bekannten Steifigkeiten die Schnittgrößen für einen in eine endliche Anzahl von Abschnitten unterteilten Stab auf interaktivem Wege angegeben werden kann. Auf eine formelmäßige Wiedergabe der Gleichgewichtsbeziehungen am Stabelement sowie der Rekursionsformeln zur Übertragung der Zustandsgrößen wird an dieser Stelle verzichtet. Der nichtlineare Zusammenhang zwischen Biegemoment und Krümmung wurde als abschnittsweise linear vorausgesetzt, wobei eine beliebig genaue Einteilung der Momenten-Krümmungslinie möglich war. Die theoretischen Grundlagen hierzu sind in /8/ im einzelnen erläutert. Um die Durchbiegung auch bei kleinen Laststufen genügend genau erfassen zu können, wurde von der maxi-

malen Krümmung ausgehend eine Aufteilung der Momenten-Krümmungs-Linie in 50 - 100 Abschnitte vorgenommen. Die Vorgabe einer beliebig geformten Spannungs-Dehnungslinie zur Werkstoffbeschreibung war möglich und auch eine eventuell vorhandene Putzschicht konnte durch die Angabe einer "fiktiven Druckbewehrung" mit entsprechendem Materialgesetz berücksichtigt werden. Die flächenartige Horizontalbelastung infolge des Luftkissendruckes wurde - bezogen auf eine Wandbreite von 1 m - in gleichwertige Einzelbelastungsgrößen bei einer Unterteilung des Stabes in 12 Abschnitte umgerechnet.

Die Kopf- und Fußeinspannung der Versuchswände II/3 und II/6 war durch die Eingabe einer Drehfeder-Konstante zu berücksichtigen. Dabei wurde davon ausgegangen, daß eine Auflagerverdrehung der Prüfwand im Versuchstand nur im Bereich des Mauerwerks möglich war, weil die Stahlteile (Bild 19) einer Verdrehung einen erheblich größeren Widerstand im Bruchzustand entgegensetzen als das Mauerwerk.

5.3.3 Materialgesetze und Einspannverhältnisse

5.3.3.1 Materialgesetze

Grundlagen zur Formulierung der Materialgesetze für die geprüften Mauerwerkswände waren die in den ergänzenden Untersuchungen ermittelten Spannungsdehnungslinien für zentrisch oder exzentrisch belastete Norm-Prüfkörper. Die wichtigsten Kennwerte sind der Scheitelwert der Druckfestigkeit β_s und die dazugehörige Dehnung ε_s . Darüber hinaus ermöglichten die bei exzentrischer Prüfung von Norm-Prüfkörpern gemessenen maximalen Stauchungen sowie die am Druckrand geschoßhoher Mauerwerkswände ermittelten Stauchungen eine Aussage über den plastischen Bereich des zu formulierenden Materialgesetzes.

In Tabelle 23 können die unter Berücksichtigung unterschiedlicher Lasteinleitung an Norm-Prüfkörpern und geschoßhohen Wänden gemessenen Druckstauchungen während des Bruches miteinander verglichen werden. Man erkennt, daß in den meisten Fällen die gemessenen Stauchungen am Druckrand

exzentrisch belasteter Norm-Prüfkörper und geschoßhoher Wände größer sind als die an zentrisch belasteten Norm-Prüfkörpern ermittelten Werte.

Die Materialgesetze, mit deren Hilfe die im Versuch gemessenen Wanddurchbiegungen rechnerisch zu überprüfen waren, sind in Bild 84 dargestellt. Dabei entsprechen die zu Grunde gelegten Einzelwerte der Arbeitslinien entweder den Mittelwerten oder den oberen bzw. unteren Grenzen der an Norm-Prüfkörpern ermittelten Prüfergebnisse einer untersuchten Mauerwerksart.

Der Elastizitätsmodul E_{mw} gibt über die Beziehung

$$n = - \frac{E_{mw} \cdot \epsilon_s}{B_s} \quad (8)$$

Auskunft über die Völligkeit der Spannungsdehnungslinie bis zum Scheitelwert der Druckfestigkeit. Daher ergibt sich für

$n = 1$ ein linearer Verlauf der σ - ϵ -Linie bis B_s und für

$n = 2$ ein Verlauf der σ - ϵ -Linie in Form einer quadratischen Parabel.

In der obigen Formel (8) bedeuten

- E_{mw} Elastizitätsmodul des Mauerwerks
- ϵ_s zum Scheitelwert der Druckfestigkeit gehörige Stauchung
bei der zentrischen Prüfung von Rilem-Prüfkörpern
- B_s Scheitelwert der Druckfestigkeit
- n Exponent der Spannungsfunktion der σ - ϵ -Linie bis B_s

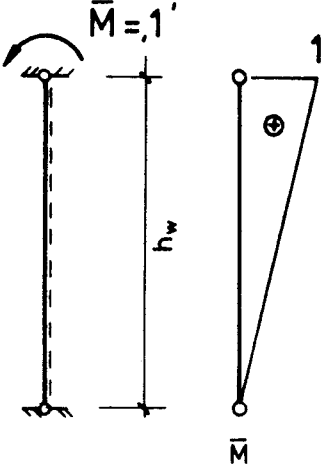
Im Hinblick auf die Formulierung eines einheitlichen Werkstoffgesetzes für Mauerwerk wurden daher die in DIN 1045, Abschnitt 17.2, aufgeführte Arbeitslinienform für weitere Traglastberechnungen mit verwendet.

Die Mauerwerkswände I/3 und II/8 waren mit einem Kalkputz, die Prüfwand II/1 mit einem Zementputz versehen worden. Die Kennwerte zur Formulierung eines Materialgesetzes für diese Putze wurden in Anlehnung an DIN 1048 an stehend geprüften Putzmörtelprismen $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ermittelt und bei der

Verformungsberechnung als Ausgangsgrößen für eine "fiktive Druckbewehrung" verwendet. In Bild 84 sind diese Materialgesetze ebenfalls enthalten.

5.3.3.2 Einspanngrade der Mauerwerkswände II/3 und II/6

Vergleichsrechnungen ergaben, daß an Kopf und Fuß der Prüfwände II/3 und II/6 (siehe Bild 19) keine starre, sondern nur eine teilweise Einspannung der Mauerwerkswände erreicht werden konnte. Aus diesem Grunde wurde hier eine Drehfederkonstante eingeführt, um den Einspanngrad des Systems zu berücksichtigen. Diese wurde mit Hilfe des Arbeitssatzes wie folgt ermittelt:



DREHFEDERKONSTANTE:

$$c_F = \frac{1}{\delta_{11}}$$

$$\delta_{11} = \int \frac{M M}{E_{mw} I^I} ds \quad (9)$$

$$c_F = \frac{3 E_{mw} I^I}{h_w}$$

Die Ribbildung in der Mauerwerkswand konnte durch eine Verringerung des für den Zustand I berechneten Trägheitsmomentes J^I berücksichtigt werden. Mit

$$J^{II} = \varphi J^I$$

wird

$$c_F^{II} = \frac{3 E I^I}{h_w} \varphi \quad (10)$$

Hierin bedeuten:

- C_F^{II} Drehfederkonstante an der Kopf- und Fußbeanspruchung unter Berücksichtigung der Rißbildung in der Mauerwerkswand (kNm/rad)
- φ Abminderungsfaktor des Trägheitsmomentes im Zustand I zur Berücksichtigung des Zustands II
 Versuch II/3: $\varphi = 0,6$ } geschätzte
 Versuch II/6: $\varphi = 0,4$ } Werte
- E_{mw} Elastizitätsmodul des Mauerwerks
- J^I Trägheitsmoment im Zustand I
- h_w Wandhöhe

Wie im folgenden gezeigt wird, konnten mit dieser Näherung brauchbare Ergebnisse erzielt werden.

5.3.4 Wiedergabe und Kommentierung der rechnerisch ermittelten Durchbiegungen

In den Bildern 85 bis 95 sind die gemessenen und rechnerisch ermittelten Mittendurchbiegungen w_{max} (mm) der Mauerwerkswände der Versuchsserien I und II während ausgewählter Laststufen p_H (kN/m) graphisch gegenübergestellt, ausgenommen Wand II/8, die größere Imperfektionen aufwies.

Es wird deutlich, daß in allen Fällen eine brauchbare Übereinstimmung der rechnerisch ermittelten und gemessenen Werte erzielt wurde. Die Übereinstimmung der Ergebnisse von Verformungsberechnungen bei Verwendung der σ - ϵ -Linie nach DIN 1045 ist auch für diejenigen Mauerwerksarten recht gut, bei denen in den ergänzenden Untersuchungen Stauchungen über 3,5 ‰ festgestellt wurden (Bild 85). Oftmals konnten mit dieser Arbeitslinie rechnerisch zunächst als zu groß ermittelte Durchbiegungen an den gemessenen Durchbiegungsverlauf angeglichen werden.

Die Beteiligung des Putzes an der Biegetragfähigkeit der Mauerwerkswände konnte ebenfalls festgestellt werden (Bilder 87 bis 90). Sogar bei den kalkverputzten Wänden war eine Traglasterhöhung vorhanden.

Der Näherungsansatz zur Berücksichtigung des Einspanngrades am Kopf- und Fußpunkt der Versuchswände II/3 und II/6 hat zutreffende Ergebnisse erbracht. Beispielhaft hierfür sind im Bild 12 rechnerische und gemessene Mittendurchbiegungen w_{\max} sowie die rechnerisch ermittelten Biegemomente

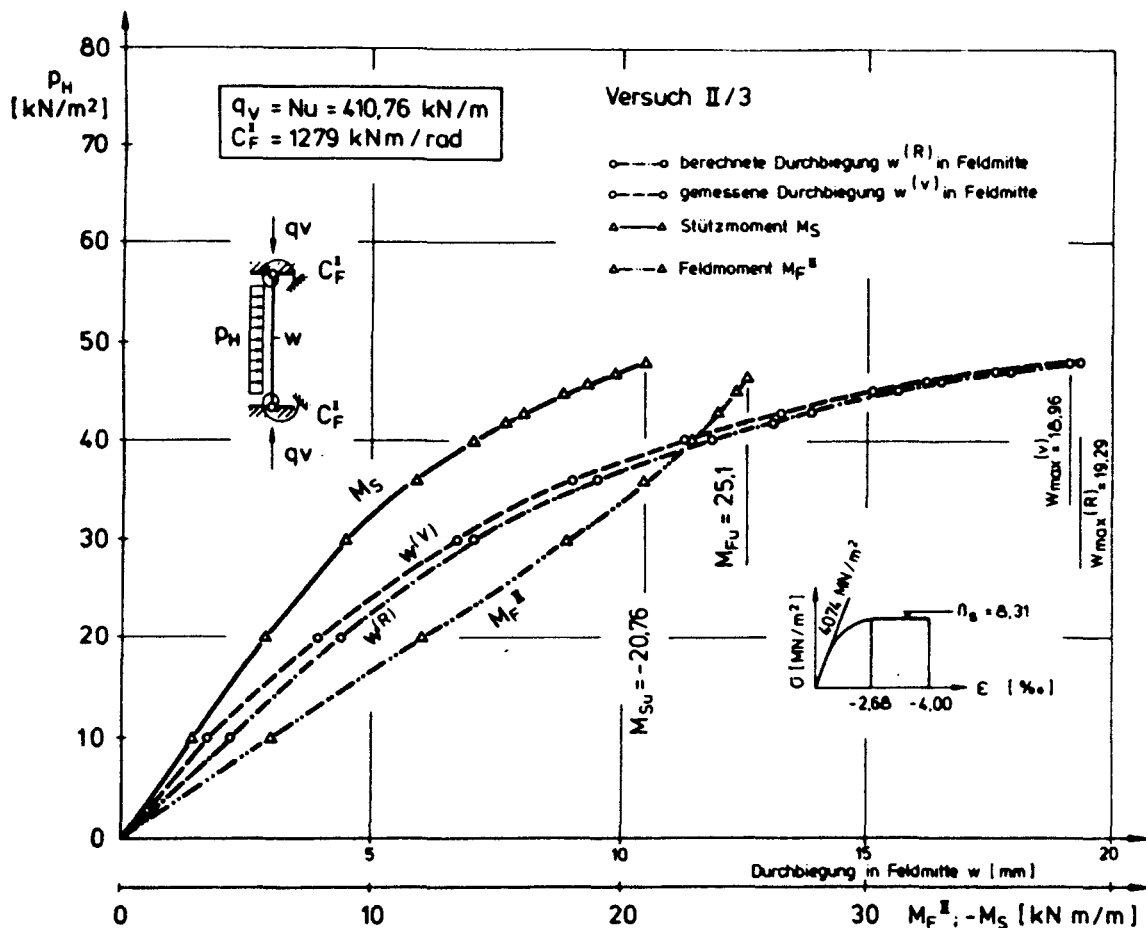


Bild 12: Gemessene und rechnerisch ermittelte Durchbiegungen sowie Biegemomente der Versuchswand III/3

an der Einspannstelle M_S und im Feld M_F^{II} des Versuches II/3 in Abhängigkeit der Horizontalbelastung dargestellt. In Bild 12 ist zu erkennen, daß wie im Versuch, der Bruch im Feld eintritt und die Größe des Stützmomentes sich rechnerisch bis auf das 0,8fache an den Wert des Feldmomentes annähert. Dies ist ein Indiz dafür, daß die Annahme einer Momentenumlagerung vom Feldbereich zur Stützung, wie in /1/ beschrieben, auch im Prüf-

stand nachgewiesen werden konnte. Gemessene und rechnerisch ermittelte Durchbiegungen stimmen nahezu überein, und an der Einspannstelle stellt sich eine Lastausmitte von

$$e_s = -20,76/410,76 = 0,051 \text{ m}$$

ein. Dieser Wert entspricht annähernd dem Abstand von der Prüfwandachse bis zur Außenkante des die Einspannung bewirkenden Flachstahls 40 x 100 mm von 5 cm (Bild 19). Damit wurde rechnerisch die Lastausmitte erreicht, die das Kippen der Wand im Versuchsstand über die Flachstahlleiste verursachte und den Bruch der Prüfwand auslöste.

6.0 Rechnerische Vorherbestimmung der Tragfähigkeit von einachsiger lastabtragenden Mauerwerkswänden

6.1 Allgemeines

Die derzeitigen Schutzraumbau-Bestimmungen /7/ geben hinsichtlich der Tragfähigkeitsmerkmale von Schutzräumen unter anderem zwei wesentliche Anforderungen zur Gewährleistung eines Grundschutzes an. Diese sind

- Mauerwerkswanddicken von $d \geq 36^5$ cm
- Horizontale Tragfähigkeit der Schutzraumwände mindestens 1000 kg/m^2 ($10 \text{ kN/m}^2 = 0,1 \text{ bar}$).

Schutzräume, die problemlos für eine breite Bevölkerungsschicht nutzbar zu machen sind, sollten sich u.E.in Kellerräumen von Wohngebäuden befinden. Kellerräume besitzen in vielen Fällen eine lichte Raumhöhe von maximal 2,40 - 2,50 m. DIN 1053 Teil 2 "Mauerwerk nach Eignungsprüfung, Berechnung und Ausführung" beschreibt in Abschnitt 7.2 die Schlankheit einer Mauerwerkswand durch

$$\bar{\lambda} = h_K/d$$

mit

h_K Knicklänge der Wand
 d Wanddicke

Vorhandene Kellerwände aus DIN- oder "reichsformatigen" (Seitenlänge 25 cm) Mauersteinen weisen oftmals jedoch nur eine Dicke von 25 cm auf. Unter der ungünstigen Annahme eines gelenkigen Anschlusses der Mauerwerkswand an die vorhandenen Decken- und Sohlplatten besitzen diese somit eine Schlankheit von $\bar{\lambda} = 10$.

Für diese Wände wurde beispielhaft ein Bemessungsvorschlag entwickelt, welcher eine Vorherbestimmung der Tragfähigkeit von einachsiger lastabtragenden Mauerwerkswänden erlaubt. Hierdurch wird es möglich, diejenige Wandauflast anzugeben, die in Abhängigkeit der vorhandenen Mauerwerkdruckfestigkeit $\beta_{D,mw} = \beta_R$ erforderlich ist, um eine horizontale Druckbeanspruchung von mindestens $0,1 \text{ bar} = 10 \text{ kN/m}^2$ aufnehmen zu können.

6.2 Nachweis nach DIN 1053 Teil 2

Die DIN 1053 Teil 2, Ausgabe Juli 1984, gibt in den Abschnitten 6.7 und 7.2 Bemessungsregeln an, nach denen horizontal und vertikal beanspruchte Mauerwerkswände unter Berücksichtigung des Knickeinflusses durch einen Traglastnachweis nach Theorie II. Ordnung berechnet werden können. Hierbei werden folgende idealisierte Verhältnisse vorausgesetzt:

- Verwendung eines linearen Werkstoffgesetzes ohne plastische Bereiche
- Gerade Stabachse
- Ebenbleiben der Querschnitte
- Aufklaffen des Querschnittes unter Gebrauchslasten bis zur halben Querschnittsdicke

Von Mann /9/ wird folgende Gleichung zur Ermittlung der Verformung f_D nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung einer ungewollten Stabverformung von $f_1 = h_K/300$ angegeben, die näherungsweise auch gerissene Querschnitte in Teilbereichen einer Mauerwerkswand mit einschließt.

$$f_D = f_1 + f_2 = \bar{\lambda} \frac{1+m}{2400} h_K \quad (11)$$

Hierin bedeuten:

$m = \frac{6e}{d}$ bezogene Lastausmitte

$\bar{\lambda} = \frac{h_K}{d}$ Schlankheit

h_K Knicklänge der Wand

d Wanddicke

Für den gerissenen Querschnitt gilt für einen Traglastnachweis im rechnerischen Bruchzustand:

$$\frac{d}{6} < e + f_D < \frac{d}{2}$$

Der theoretische Grenzwert für $e + f_D$ von $d/2$ wird natürlich nicht erreicht, da in diesem Fall die Normalkraft am Querschnittsrand stehen

würde, welche dann mit einer unendlich großen Randspannung im Gleichgewicht stehen müßte (Bild 13).

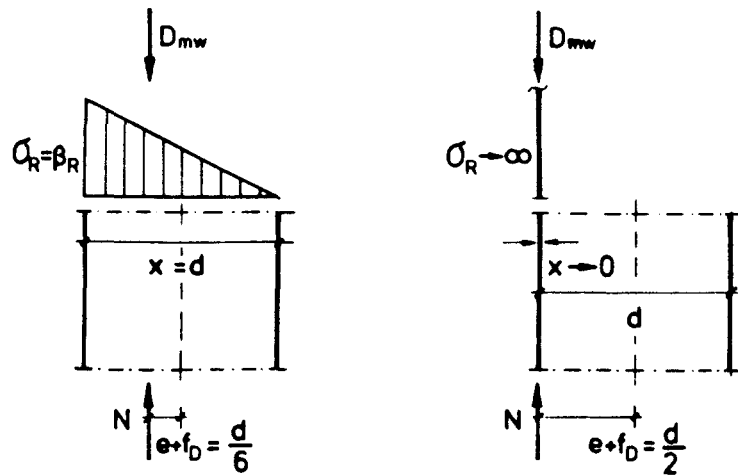


Bild 13: Druckspannungsverläufe exzentrisch beanspruchter Mauerwerksquerschnitte nach DIN 1053 Teil 2

Es stellt sich nun die Frage, ob die in der DIN 1053 formulierten Bemessungsgrundsätze rechnerischen Überprüfung der in den Versuchsserien I und II ermittelten Ergebnisse angewendet werden können. Deshalb wurde, ausgehend von dem in der DIN 1053 festgelegten Prinzip des Spannungsnachweises, ein Traglastnachweis mit den an geschoßhohen Wänden ermittelten maximalen Schnittgrößen durchgeführt.

Die Tabelle 13 gibt die Ergebnisse dieser Berechnungen für die gelenkig gelagerten Versuchswände unter Berücksichtigung von drei unterschiedlichen Verformungsansätzen wieder. Diese sind

- Ermittlung der Mittendurchbiegung f_D nach Mann /9/ ohne Berücksichtigung des Kriechens der Mauerwerkswand
- Ermittlung der Mittendurchbiegung f_D nach Mann /9/ abzüglich der ungewollten Lastausmitte von $f_1 = h_K/300$:

$$f_2 = f_D - f_1 = h_K \left(\bar{\lambda} \frac{1+m}{2400} - \frac{1}{300} \right) \quad (12)$$

- Mittendurchbiegung w_{\max} als in den Versuchsserien I und II festgestellter maximaler Durchbiegungswert.

Versuch		I/1	I/2	I/3	I/4	I/5	II/1	II/2	II/4	II/7	II/8
p_H	[kN/m ²]	44,06	60,51	62,61	7,29	11,08	49,52	36,80	19,60	29,14	15,02
d	[m]	0,25	0,25	0,25	0,125	0,125	0,24	0,24	0,175	0,24	0,175
N_U	[kN/m]	357,6	529,4	527,5	193,67	273,8	401,22	346,75	295,81	270,57	465,75
M_O^I	[kNm/m]	35,16	48,29	49,96	5,817	8,842	39,52	29,37	15,64	23,25	11,99
h_K	[m]	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
m_O	[%]	2,36	2,19	2,27	1,44	1,55	2,46	2,12	1,81	2,15	0,883
$\bar{\lambda}$	[%]	10,24	10,24	10,24	20,48	20,48	10,67	10,67	14,63	10,67	14,63
f_D	[m]	0,037	0,035	0,036	0,053	0,056	0,039	0,036	0,044	0,036	0,029
f_2	[m]	0,0285	0,0265	0,0275	0,0445	0,0475	0,0305	0,0275	0,0355	0,0275	0,0205
w_{max}	[mm]	7,17	11,66	15,43	9,31	8,87	5,35	12,27	12,44	11,89	12,11
$M^{(1)}$	[kNm/m]	48,39	67,35	68,95	16,08	24,17	55,18	41,85	28,66	32,99	25,50
$M^{(2)}$	[kNm/m]	45,35	62,32	64,47	14,44	21,85	51,76	38,91	26,14	30,69	21,54
$M^{(3)}$	[kNm/m]	37,72	54,46	58,10	7,62	11,27	41,67	33,62	19,32	26,47	17,63
$e^{(1)}$	[m]	0,135	9,127	0,131	0,085	0,088	0,137	0,121	0,097	0,122	0,055
$e^{(2)}$	[m]	0,127	0,120	0,122	0,075	0,079	0,129	0,112	0,089	0,113	0,046
$e^{(3)}$	[m]	0,105	0,103	0,110	0,040	0,041	0,104	0,097	0,065	0,098	0,038
$\sigma_R^{(1)}$	[MN/m ²]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,553
$\sigma_R^{(2)}$	[MN/m ²]	-	70,5	117,2	-	-	-	28,9	-	25,72	7,48
$\sigma_R^{(3)}$	[MN/m ²]	11,92	16,04	23,43	6,69	8,49	16,72	10,05	8,74	8,20	6,27
σ_{OR}	[MN/m ²]	8,94	10,46	11,56	9,972	6,04	6,57	5,681	5,681	5,31	5,01
$B_S^{(HV)}$	[MN/m ²]	7,4	9,65	8,90	15,32	10,51	7,05	7,05	7,05	5,52	6,09

Zeichenerklärung:

- p_H : Horizontale flächenlastartige Beanspruchung der Wand
 d : Mauerwerksdicke
 N_U : Normalkraft im Bruchzustand
 M_O^I : Feldmoment nach Theorie I. Ordnung
 h_K : Ersatzstablänge der Mauerwerkswand
 m_O : Bezogene Ausmitte: $m_O = \frac{6 \cdot M_O^I}{N_U \cdot d}$
 λ : Schlankheit: $\bar{\lambda} = h_K/d$
 f_D : Mittendurchbiegung nach dem Verformungsansatz von Mann /9/
 f_2 : Mittendurchbiegung nach Mann / 9/ abzüglich der ungewollten Lastausmitte $f_1 = h_K/300$
 w_{max} : In den Versuchsserien I und II gemessene Mittendurchbiegung
 $M^{(1)}; M^{(2)}; M^{(3)}$: Biegemomente nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung verschiedener Verformungen f_D , f_2 und w_{max}
 $e^{(1)}; e^{(2)}; e^{(3)}$: Lastausmitten
 $\sigma_R^{(1)}$: Randspannung bei Verwendung von $M^{(1)}$ und N_U
 $\sigma_R^{(2)}$: Randspannung bei Verwendung von $M^{(2)}$ und N_U
 $\sigma_R^{(3)}$: Randspannung bei Verwendung von $M^{(3)}$ und N_U
 σ_{OR} : Randspannung bei Verwendung von M_O^I und N_U (also ohne Berücksichtigung der Verformung)
 B_S^{NV} : In den Nebenversuchen (NV) ermittelter Scheitelwert der Druckfestigkeit von Rilem-Prüfkörpern

Bibl. d. TU
Braunschweig

Tabelle 13: Traglastberechnungen nach DIN 1053 Teil 2, Abschn. 6.7 u. 7.2

Mit den so ermittelten Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung wurde ein Spannungsnachweis durchgeführt und die sich hieraus ergebende maximale Randspannung σ_R den in den ergänzenden Untersuchungen an Norm-Prüfkörpern festgestellten Druckfestigkeitswerten $\beta_s^{(NV)}$ als obere Grenzspannung gegenübergestellt:

$$\sigma_R < \beta_s^{(NV)}$$

Aus der Tabelle 13 ist zu entnehmen, daß die Ausmitten $e^{(1)}$ und $e^{(2)}$ in den meisten Fällen größer sind als die halbe Dicke des Mauerwerksquerschnittes. Daher erreichen die zugehörigen Randspannungen $\sigma_R^{(1)}$ und $\sigma_R^{(2)}$ rechnerisch einen unendlich großen Wert. Selbst bei Verwendung der in den Hauptversuchen gemessenen Mittendurchbiegung w_{\max} nehmen die Randspannungen $\sigma_R^{(3)}$ Werte an, die größer sind als $\beta_s^{(NV)}$. Auch wenn die Durchbiegung bei der Ermittlung der Randspannungen σ_{OR} nicht berücksichtigt wird, werden die so errechneten Spannungen noch zu hoch ermittelt.

Daher wird deutlich, daß ein anderes Bemessungsverfahren als das in der DIN 1053 Teil 2 vorgeschlagene angewendet werden muß, um die Biegetragfähigkeit der untersuchten Mauerwerkswände während des Bruches zutreffend zu beschreiben.

6.3 Nachweis unter Verwendung eines zutreffenden Wertes der Mittendurchbiegung

In /1/ wurde im Kapitel 6.0 eine Möglichkeit aufgezeigt, die horizontale Traglast einer gemauerten Wand bei bekannter Mauerwerksdruckfestigkeit und vertikaler Auflast zu ermitteln.

Das dort beschriebene Verfahren setzt voraus, daß bei bekanntem Materialgesetz nach der Ermittlung des Normalkraft-abhängigen Bruchmomentes M_u aus einem Interaktionsdiagramm durch Variation der Randdehnungen eine Momenten-Krümmungsbeziehung zu formulieren ist, mit deren Hilfe die Mittendurchbiegung

$$w_{\max} = \int M \cdot k \cdot dx \quad (13)$$

berechnet werden kann.

Daraus ergibt sich dann das Zusatzmoment M^{II} nach Theorie II. Ordnung zu

$$\Delta M^{II} = N_u \cdot w_{\max}$$

Da sich das Bruchmoment M_u zusammensetzt aus

$$M_u = M_o^I + \Delta M^{II}$$

beträgt das Biegemoment nach Theorie I. Ordnung

$$M_o^I = M_u - \Delta M^{II}$$

Bei bekannter Verteilung der Horizontalbelastung p_H über die Mauerwerks-
wand läßt sich hieraus der maximal aufnehmbare Horizontaldruck leicht
berechnen. Dieser beträgt z.B. bei einer gleichlastartigen Horizontal-
druckverteilung und gelenkig gelagerten Stabenden der Mauerwerkswand

$$p_H = 8 \cdot M_o^I / L^2 \quad (14)$$

Die Berechnung der für dieses Verfahren notwendigen Momenten-Krümmungs-
Linien ist recht aufwendig und in den meisten Fällen nur mit Hilfe ge-
eigneter EDV-Programme möglich. Aus diesem Grunde wird empfohlen, für
eine praxisübliche Berechnung des maximal aufnehmbaren Horizontaldruckes
einer Mauerwerkswand bei bekannter Normalkraftbelastung die in den fol-
genden Kapiteln 6.4 bis 6.5 dieses Berichtes beschriebenen Verfahren zu
verwenden.

6.4 Nachweis mit Hilfe eines praxisüblichen EDV-Stützenprogramms

Die meisten handelsüblichen Stützenprogramme für Personal-Computer bein-
halten für die Stahlbetonbemessung ein vom Benutzer nicht weiter modifi-
zierbares parabel-rechteckförmiges Werkstoffgesetz nach DIN 1045, Ab-
schnitt 17.2. Die Möglichkeit einer Anwendung dieses Materialgesetzes auf
Mauerwerkswände ist zunächst nicht offensichtlich, da die vorhandene
Literatur /11/ bekanntlich von anderen Vorstellungen ausgeht. Veröffent-
lichungen von Zelger /5 - 6/ und auch die eigenen Untersuchungen an Norm-
Versuchskörpern und geschoßhohen Wandstreifen der Hauptversuche haben wie
oben ausgeführt gezeigt, daß exzentrisch beanspruchte Mauerwerkswände
durchaus ähnliche oder größere Stauchungen am Druckrand aufweisen als sie

das Parabel-Rechteckdiagramm nach DIN 1045 berücksichtigt (Tabelle 23). Außerdem bestätigt das in Bild 11 dieses Berichtes dargestellte M-N-Diagramm, daß bei geringer Normalkraftbeanspruchung weit unterhalb des Balance-Points die Form des Materialgesetzes für die Bestimmung des Bruchmomentes eine untergeordnete Rolle spielt. Es wird daher empfohlen, daß Werkstoffgesetz nach DIN 1045 auch für die Bemessung von Mauerwerkswänden zu benutzen.

Damit wird es möglich, die in jedem Ingenieurbüro verfügbaren EDV-Stützenprogramme, welche geometrische und physikalische Nicht-Linearität von Stabwerken sowie Querlasten berücksichtigen, bei der Ermittlung der horizontalen Traglast von Mauerwerkswänden zu benutzen. Bei der Beurteilung des einachsigen Biegetragverhaltens ist daher ein Wandstreifen von 1 m Breite und der Dicke d mit einer als bekannt vorausgesetzten Vertikalkraft zentrisch oder auch exzentrisch (Einspannungen), zu belasten. Die Horizontalbelastung p_H ist so lange zu steigern, bis das System instabil wird. Bei der programmgesteuerten Abfrage des zu berücksichtigenden Bewehrungsquerschnitts ist dieser mit 0 oder einem sehr kleinen Wert (10^{-9}) einzusetzen. Wie das folgende Kapitel 6.5 zeigt, werden hierdurch brauchbare Ergebnisse erzielt.

6.5 Ermittlung eines Traglastdiagramms

Wie oben gezeigt, ergeben vorhandene "normgerechte" Berechnungsmethoden z.B. nach DIN 1053 Teil 2 nur eine unbefriedigende Auskunft über die maximale horizontale Biegetragfähigkeit gemauerter Wände im Bruchzustand.

Für eine einfache und schnelle Lösung des beschriebenen Problems empfiehlt es sich, das im Bild 14 dargestellte Traglastdiagramm zu verwenden, welches mit Hilfe eines Bemessungsprogramms für Stahlbetonstützen konstruiert werden konnte. Es gilt für Mauerwerkswände der Dicke $d = 25 \text{ cm}$ (Reichsformat-Mauersteine) und einer Schlankheit $\bar{\lambda} = h_K/d = 10$.

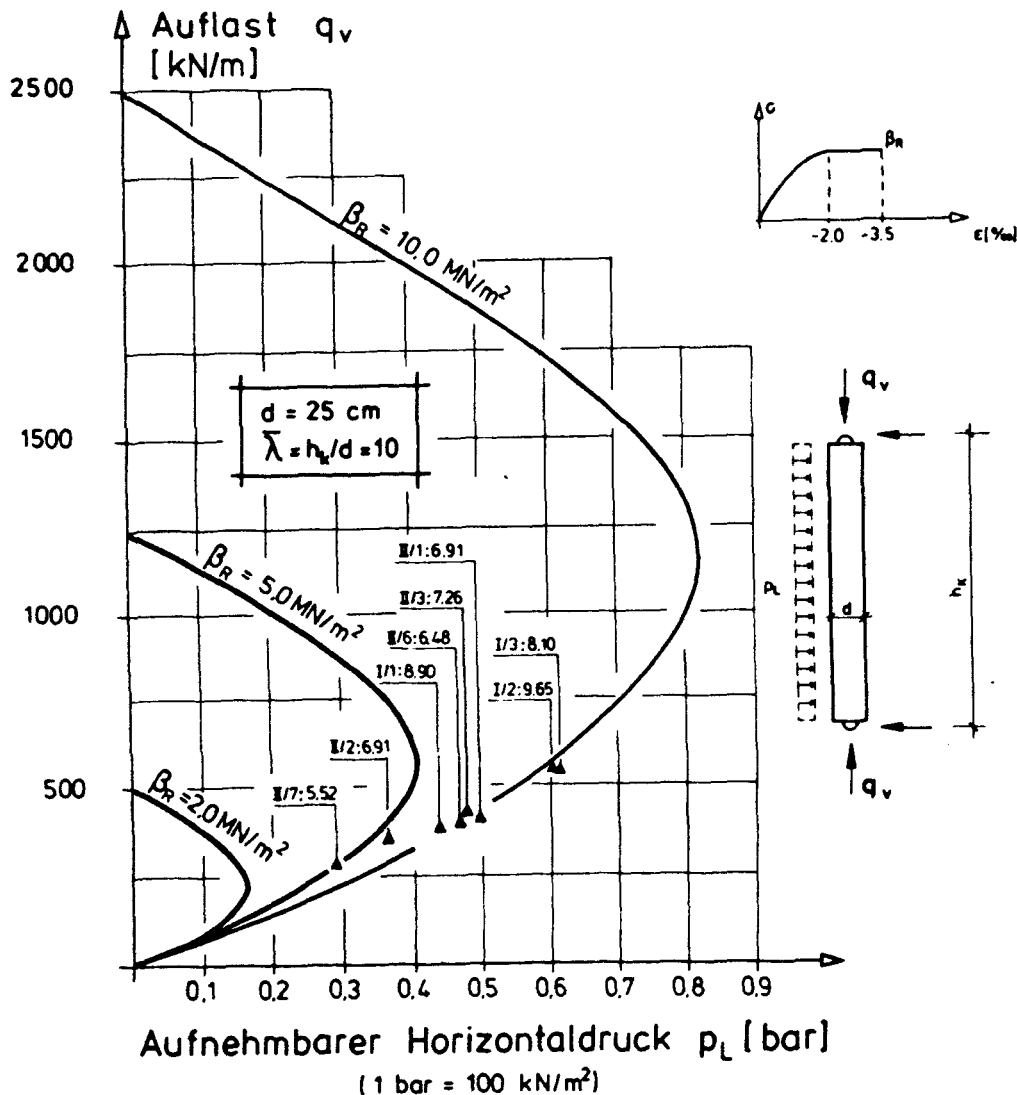


Bild 14: Traglastdiagramm

Auf der Ordinate ist als Eingangsgröße die Vertikalbelastung als Normalkraft N_u in kN/m und auf der Abzisse die horizontale Luftdruckbeanspruchung p_L in bar entsprechend 10^{-2} kN/m^2 dargestellt. Unter Verwendung des Materialgesetzes nach DIN 1045, Abschnitt 17.2, wurden bei Variation des Rechenwertes der Mauerwerksdruckfestigkeit β_R in dem Traglastdiagramm Kurvenscharen konstruiert, welche augenscheinlich dem Interaktionsdiagramm des Bildes 11 ähnlich sind. Der traglastmindernde Einfluß der Wandverformung ist hierbei bereits berücksichtigt. Natürlich sind hierdurch nicht alle in der Praxis vorkommenden Mauerwerkswände zu erfassen. Auch stellt die Annahme einer gelenkigen Lagerung am Kopf- und Fußpunkt der Mauerwerkswand eine, auf der sicheren Seite liegende Vereinfachung dar.

Um den Bezug zu den an geschoßhohen Wänden ermittelten Untersuchungsergebnissen deutlich zu machen, wurden die an vergleichbaren Mauerwerkswänden erreichten Traglastkennwerte N_u und p_L mit in das Diagramm eingetragen. Zu jedem Punkt wurden die in den zugehörigen Nebenversuchen ermittelten Druckfestigkeiten angegeben. Es wird deutlich, daß sämtliche Versuchswerte entweder auf oder knapp unter der theoretischen Traglastkurve liegen. Die Traglastkurven beschreiben also die Biegetragfähigkeit von gemauerten Wänden in einer zutreffenden Weise. Es erscheint daher sinnvoll, in Zukunft derartige Traglastdiagramme auch für andere Schlankheiten und engere Druckfestigkeitsbereiche zu entwickeln.

6.6 Vorschläge zur Formulierung eines Sicherheitskonzepts und Einfluß der Bewehrung

Der Sicherheitsabstand zwischen Bruchzustand und Gebrauchszustand kann am einfachsten durch die Einführung eines Sicherheitsbeiwertes berücksichtigt werden. Dieser Beiwert soll zunächst zu $\gamma = 1,25$ bzw. $1/\gamma = 0,8$ angenommen werden.

Als zweiter Schritt stellt sich nun die Frage, welche mechanische Kenngröße mit dem Sicherheitsbeiwert beaufschlagt werden soll:

Ausgehend von dem Diagramm des Bildes 15, welches einen Ausschnitt unterhalb des Balance-Points des Bildes 14 darstellt, können folgende Maßnahmen zur Erzielung eines notwendigen Sicherheitsabstandes vorgenommen werden:

- Reduzierung des Rechenwertes der Druckfestigkeit des Mauerwerkes β_R
- Rechnerische Reduzierung der Wandauflast $q_v = -N_u$
- Rechnerische Erhöhung der horizontalen Luftdruckbeanspruchung p_L

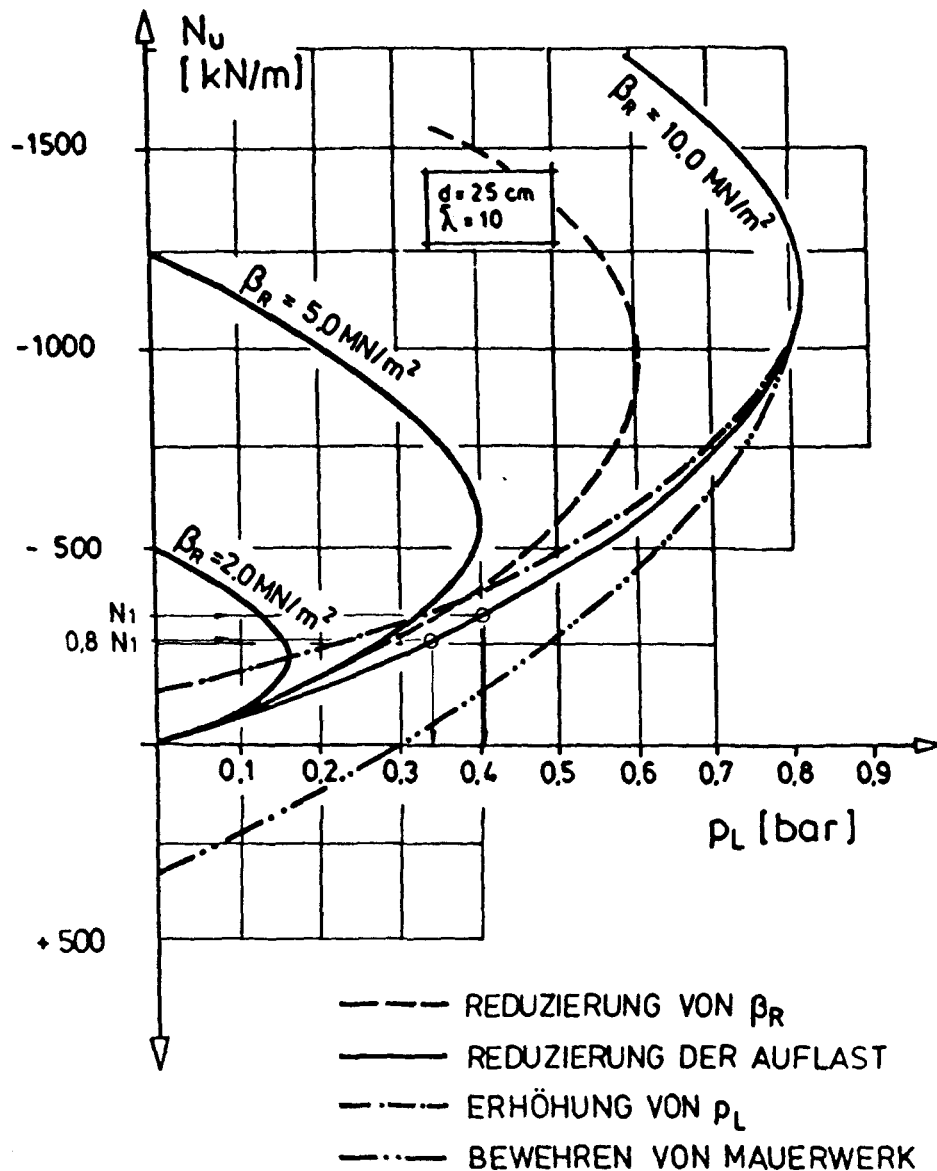


Bild 15: Berücksichtigung von Sicherheitskonzepten in einem Traglastdiagramm

Eine Reduzierung von β_R bewirkt lediglich in einem Bereich nahe am Balance-Point der jeweiligen Traglastkurve eine Verminderung der aufnehmbaren Horizontalbelastung p_L . Dieser Bereich ist aber mit ansteigender Mauerwerksdruckfestigkeit von untergeordnetem Interesse. Da bei geringer Vertikalbelastung der Mauerwerkswand die Traglastkurven unterschiedlicher Druckfestigkeit sehr nahe zusammenliegen, wird der notwendige Sicherheitsabstand bis zum Bruch zu gering. Die Möglichkeit der Reduzierung von β_R wird daher als unbrauchbar angesehen und für eine Sicherheitsbetrachtung als nicht verwertbar eingestuft.

Die Reduzierung der Auflast führt zu einer Verringerung der bei der Bemessung einer Wand zu ermittelnden zulässigen Horizontalbelastung. Dieser Lösungsvorschlag zur Berücksichtigung eines Sicherheitsabstandes ist in allen Bereichen der Traglastkurven möglich und man erhält zulässige Horizontalbelastungen, die in einer nicht linearen Beziehung zu den entsprechenden Wandauflasten stehen.

Die im Bild 15 dargestellten Traglastkurven markieren die Grenzbereiche zwischen der Standsicherheit und dem Bruchzustand gemauerter Wände. Sie beeinhaltet also bereits eine Erhöhung des horizontalen Luftdruckes gegenüber der Horizontalbelastung vor dem Bruch. Zur Erzielung eines Sicherheitsabstandes sind die Traglastkurven also in den sicheren Bereich hinein zu verschieben. Dies ist im Bild 15 durch die Strich-Punkt-Linie angedeutet.

Zusätzlich wird im Diagramm Bild 15 angedeutet, wie sich eine Erhöhung der Biegetragfähigkeit von Wänden aus Mauerwerk - z.B. durch eine nachträgliche Bewehrung - auswirken kann. Eine Bewehrung verleiht der Wand eine nennenswerte Biegezugfestigkeit; für die Erzielung eines Gleichgewichtszustandes im betrachteten Bemessungsquerschnitt gegenüber Horizontallasten ist dann eine äußere Normalkraft nicht mehr erforderlich. Eine nicht durch Querwände ausgesteifte bewehrte Mauerwerkswand ist in diesem Fall auch bei fehlender Auflast in der Lage, einem äußeren Horizontaldruck standzuhalten, vorausgesetzt die Unverschieblichkeit der Wand in horizontaler Richtung ist gewährleistet.

Das dynamische Tragverhalten stoßartig belasteter Wandkonstruktionen kann nach den umfangreichen experimentellen Untersuchungen von Reichenbach und Mayrhofer näherungsweise mit dem Modell des Ein-Massen-Schwingers beschrieben werden /11/. Das bedeutet, daß die Grenztragfähigkeit von Mauerwerk bei dynamischer Beanspruchung grundsätzlich durch seine Traglast bei statischer Beanspruchung - korrigiert mit dem dynamischen Lastbeiwert $\lambda = p_{\text{dyn}}/p_{\text{stat}}$ - beschrieben werden kann.

Hierbei ist zu beachten, daß näherungsweise

- bei impulsartiger Belastung (Belastungsdauer zu Eigenschwingungsdauer < 1): der dynamische Lastbeiwert $\lambda > 1$ beträgt und von Wandbaustoff und -dicke abhängt, hingegen
- bei quasistatischer Belastung (Belastungsdauer zu Eigenschwingungsdauer < 1): der dynamische Lastbeiwert $1 > \lambda \geq 0,7$ beträgt und wandspezifische Einflüsse nicht mehr zu beachten sind.

Im kritischen quasistatischen Bereich beträgt die dynamische Traglast also nur etwa 70 % der statischen Traglast: Somit muß zur Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens bei stoßartiger Druckbeanspruchung die statische Traglast einer bestimmten Wandkonstruktion 40 % über der geforderten Nennlast liegen.

7.0 Tragfähigkeit von kreuzweise lastabtragenden Mauerwerkswänden

7.1 Allgemeines

Die Kenntnis der kreuzweisen Biegebeanspruchbarkeit (Plattentragwirkung) von horizontal und vertikal belasteten gemauerten Wänden ist in zweierlei Hinsicht für die Erörterung der Biegetragfähigkeit von Mauerwerk von großem Interesse.

Zum einen ist es für die wirklichkeitsnahe Beurteilung der Tragfähigkeit von gemauerten Kellerwänden notwendig die traglaststeigernde Wirkung von Querwänden zu berücksichtigen, da die Untersuchung von Wandstreifen lediglich die Verhältnisse an (unendlich) langen Wänden ohne Aussteifungen simuliert. Die durch Aussteifungen erzeugte horizontale Tragwirkung trägt um so größere Anteile der Gesamtlast, je geringer ihr Abstand, genauer, je geringer das Verhältnis von Breite zu Höhe der zu beurteilenden Wand ist. Daher ist zum anderen im Hinblick auf eine Verstärkung von gemauerten Kellerwänden die Frage zu beantworten, welcher Abstand für nachträglich anzubringende Aussteifungsglieder zu wählen ist, um eine gewünschte Druckbeanspruchung aufnehmen zu können.

7.2 Grundlagen

Mit der rechnerischen Beschreibung der plattenartigen Tragwirkung gemauerter Wände haben sich bereits verschiedene Autoren befaßt. Ein ausführlicher Vergleich einzelner Rechenansätze befindet sich in /2/. Dort wird unter Einbeziehung zahlreicher Versuche festgestellt, daß die Bruchlinientheorie (z.B. /10/) die beste Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung liefert, sofern nur die Eingangswerte wie Lagerungsbedingungen und Bruchmomente hinreichend genau bekannt sind.

Das Bruchmoment des Querschnitts senkrecht zu den Lagerfugen wird im Bereich geringer Normalkraft stark von der Biegezugfestigkeit des Mauerwerks senkrecht zu den Lagerfugen beeinflusst; aus Versuchen ergab sich, daß der Einfluß der Zugspannungen auf das Bruchmoment jedoch vernachläss-

sigbar wird, sofern die durch die Normalkraft hervorgerufene mittlere Druckspannung etwa 50 % der Biegezugfestigkeit überschreitet /2/. Ist die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen unbekannt, darf sie in guter Näherung wie folgt abgeschätzt werden:

$$\beta_{BZ,y} = 0,02 \cdot \beta_s \quad (15)$$

$\beta_{BZ,y}$: Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen

β_s : Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen

Für die Lastabtragung in horizontaler Richtung ist bei Wänden das Bruchmoment des Querschnittes parallel zu den Lagerfugen maßgebend. Dieses ergibt sich ausschließlich aus der Biegezugfestigkeit des Mauerwerks.

$$M_{u,x} = \beta_{BZ,x} \cdot W_x \quad (16)$$

$M_{u,x}$: Bruchmoment parallel zu den Lagerfugen

$\beta_{BZ,x}$: Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

W_x : zu $M_{u,x}$ gehöriges Widerstandsmoment

Senkrecht zu den Lagerfugen wirkende Normalkräfte, z.B. aus Auflasten, erhöhen die Reibung zwischen Mörtel und Stein. Dadurch wird auch der Stein in zunehmendem Maße zur Aufnahme von Biegezugspannungen herangezogen. Dies wird nach /2/ durch den folgenden Ansatz erfaßt.

$$\beta_{BZ,x} = \beta^*_{BZ,x} + 0,75 \cdot \sigma_y \quad (17)$$

$\beta_{BZ,x}$: Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

$\beta^*_{BZ,x}$: Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen (anhand von Versuchen ohne Berücksichtigung von Auflasten ermittelt)

σ_y : senkrecht zu den Lagerfugen wirkende mittlere Druckspannung (z.B. aus Auflasten)

Ist die Biegezugfestigkeit ohne Berücksichtigung einer Auflast als Prüfwert unbekannt, darf $B^*_{BZ,x}$ zu

$$B^*_{BZ,x} = 3 \cdot B_{BZ,y} \quad (18)$$

abgeschätzt werden /2/.

Inwieweit in der Wand wirkende horizontale Normalkräfte das Bruchmoment $M_{u,x}$ vergrößern, wird nicht weiter verfolgt, weil solche Kräfte im hier interessierenden Bereich nicht als wirksam angesetzt werden können.

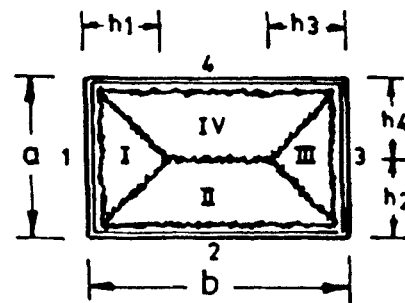
Mit den obigen Rechenansätzen können nun die Tragmomente des Querschnittes in beiden Richtungen ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der Lagerungsbedingungen des betrachteten Bauteils sind damit alle Voraussetzungen zur Ermittlung der aufnehmbaren Horizontallast gegeben.

An einem Beispiel ist in /1/ der Rechengang zur Ermittlung der Bruchmomente vorgestellt worden und braucht daher an dieser Stelle nicht wiederholt zu werden. Zur Verdeutlichung der Beanspruchungsrichtungen wird in Anlehnung an die Plattentheorie die Biegemomentenwirkung wie folgt festgelegt:

- M_x : Biegemoment, das in X-Richtung, und damit parallel zu den Lagerfugen, Zugkräfte erzeugt,
- M_y : Biegemoment, das in Y-Richtung, und damit senkrecht zu den Lagerfugen, Zugkräfte erzeugt.

Bild 04 zeigte bereits das zu beurteilende Tragsystem, welches aufgrund der Rißbildung der untersuchten Versuchswände III/1 und III/2 (Bilder 96 und 97) wie eine allseitig eingespannte Platte berechnet werden kann.

In /10/ und /11/ sind die formelmäßigen Zusammenhänge zur Berechnung der horizontalen Bruchlast aufgeführt. Diese werden hier des besseren Verständnisses wegen wiedergegeben (Bild 16).



$$p_{H,u} = \frac{M_{Fu} \cdot 24}{a_r^2} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{3 + \frac{a_r^2}{b_r^2}} - \frac{a_r}{b_r} \right)^2} ; \quad b_r \geq a_r$$

$$a_r = \frac{2 \cdot a}{\sqrt{1+i_2} + \sqrt{1+i_4}} \quad , \quad b_r = \frac{2 \cdot b}{\sqrt{1+i_3} + \sqrt{1+i_1}}$$

(19)

i = Verhältnis der Bruchmomente am Plattenrand und im Feld ($i = M_{e,u} / M_{F,u}$)

Bild 16: Bruchlinien und Traglastformel nach der Bruchlinientheorie

Aus der Beziehung

$$M_u = \frac{1}{6} \cdot p_u \cdot h^2$$

und für

$$h = \sqrt{6 \cdot \frac{M_u}{p_u}}$$

ergeben sich die das Bruchbild bestimmenden Größen h_1 bis h_4 zu

$$h_1 = h \cdot \sqrt{1+i_1}$$

$$h_3 = h \cdot \sqrt{1+i_3}$$

$$h_2 = \frac{a \cdot \sqrt{1+i_2}}{\sqrt{1+i_2} + \sqrt{1+i_4}}$$

$$h_4 = \frac{a \cdot \sqrt{1+i_4}}{\sqrt{1+i_2} + \sqrt{1+i_4}}$$

Diese Berechnungsansätze waren die Grundlage für die im nächsten Abschnitt vorgenommenen rechnerischen Überprüfungen der Versuchsergebnisse an den kreuzweise lastabtragenden Prüfwänden III/1 und III/2.

7.3 Rechnerische Überprüfung der Versuchsergebnisse von zweiachsig biegebeanspruchten Mauerwerkswänden

Die Ergebnisse der mit Hilfe der Bruchlinientheorie vorgenommenen rechnerischen Überprüfung der Versuchsergebnisse der Prüfwände III/1 und III/2 sind der Tabelle 14 zu entnehmen.

Versuch	Mauerwerks- art / MG	Putz	Wanddicke d [cm]	Auflast q_V [kN/m]	Durch- biegung w_{\max} [mm]	$\sigma_{m,y}$ [MN/m ²]	$\beta_{BZ,x}$ [MN/m ²]	$M_{u,x}$ [kNm/m]	$M_{u,y}$ [kNm/m]	$p_{H,u}^{(R)}$ [bar]	$p_{H,u}^{(V)}$ [bar]
III/1	Mz / I	-	25,00	140,0	19,75	0,56	1,12	11,67	9,27	1,40	1,34
III/2	Mz / I	P III b	28,00	66,60	9,35	0,27	0,67	9,74	7,05	1,16	1,10

$\sigma_{m,y}$	Mittlere Auflastspannung
$\beta_{BZ,x}$	Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen
$M_{u,x}$	Bruchmoment parallel zu den Lagerfugen
$M_{u,y}$	Bruchmoment senkrecht zu den Lagerfugen
$p_{H,u}^{(R)}$	Rechnerisch ermittelte horizontale Bruchlast
$p_{H,u}^{(V)}$	Gemessene horizontale Bruchlast

Tabelle 14: Traglasten kreuzweise biegebeanspruchter Mauerwerkswände III/1 und III/2

Wie im Abschnitt 7.2 erläutert, sind die Traglastmomente $M_{u,x}$ und $M_{u,y}$ abhängig von der Biegezugfestigkeit des Mauerwerks. Versuche zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit an Versuchskörpern, wie sie z.B. in /12/; /13/ beschrieben sind, wurden nicht durchgeführt. Dies erschien auch nicht sinnvoll, weil die nachträgliche Ermittlung der Biegezugfestigkeit vorhandenen Kellermauerwerks einen bedeutenden Eingriff in die Bausubstanz erfordert. Insofern ist man auf Tabellenwerte oder Rechenalgo-

rithmen, wie sie in Abschnitt 7.2 beschrieben wurden, angewiesen. Die Berechnung der Biegezugfestigkeiten senkrecht und parallel zur Lagefuge gemäß

$$B_{BZ,y} = 0,02 B_s$$

und

$$B_{BZ,x} = 3 B_{BZ,y}$$

führte zu einer ca. 20 % Unterschätzung der aufnehmbaren horizontalen Traglast p_H . Aus diesem Grunde wurden die in der Literatur /13/; /14/; /11/; /1/ angeführten Werte für die weiteren Berechnungen verwendet. Diese unterschieden sich aber erheblich (/11/: $B^{\circ}_{BZ,x} = 1,0 \text{ N/mm}^2$; /1/: $B^{\circ}_{BZ,x} = 0,39 \text{ N/mm}^2$), aus diesem Grund wurden zunächst - nach einer Mittelwertbildung - die in der Tabelle 14 aufgeführten Biegezugfestigkeiten für den weiteren Rechengang benutzt. Damit konnte eine recht gute Übereinstimmung zwischen berechneten und im Versuch gemessenen horizontalen Traglasten erreicht werden.

7.4 Rechnerische Vorhersage der Tragfähigkeit kreuzweise biegebeanspruchter Mauerwerkswände

Die rechnerische Vorhersage der Tragfähigkeit kreuzweise biegebeanspruchter Mauerwerkswände geschieht am einfachsten durch Verwendung eines Traglastdiagramms, welches nach Möglichkeit eine Vielzahl von Parametern hinsichtlich

- Lagerungsverhältnisse
- Wanddicke
- Verhältnis von Wandhöhe zu Wandlänge und
- mechanischer Kennwerte

zu berücksichtigen gestatten soll.

In /11/ wurden auf der Grundlage der Bruchlinientheorie Traglastdiagramme in normierter Schreibweise für vierseitig gelagerte Wände

- mit allseits frei drehbaren Wandenden und
- zwei verdrehbaren und zwei eingespannten Wandenden

angegeben. Diese Traglastkurven wurden übernommen und um eine weitere Kurve für allseits eingespannte vierseitig gelagerte Wände ergänzt. Alle Diagramme basieren auf den in Abschnitt 7.2 dargestellten rechnerischen Zusammenhängen zwischen horizontaler gleichmäßig verteilter Bruchlast $p_{H,u}$ und dem Bruchmoment $M_{F,u}$.

Zum Zwecke der Erweiterung dieses Ansatzes für beliebige Seitenverhältnisse und Wanddicken wurde diese Formel mittels folgender Beziehungen umgeformt:

$$k = a/b$$

$$\delta = a/d$$

$$b = \text{rechnerische Wandlänge}$$

$$d = \text{Wanddicke,}$$

wodurch sich folgende Gleichungen ergeben:

a) für allseits frei drehbar gelagerte Wände

$$\begin{aligned} k \leq 1; & \quad \frac{p_{H,u} \cdot \delta^2}{\sigma_{BZ}} = \frac{4}{(\sqrt{3+k^2} - k)^2} \\ k \geq 1; & \quad \frac{p_{H,u} \cdot \delta^2}{\sigma_{BZ}} = \frac{4 \cdot k^2}{\left(\sqrt{3 + \frac{1}{k^2}} - \frac{1}{k}\right)^2} \end{aligned} \quad (20)$$

b) zwei frei drehbar gelagerte und zwei eingespannte Wandenden

$$\begin{aligned} k \leq 1; & \quad \frac{p_{H,u} \cdot \delta^2}{\sigma_{BZ}} = \frac{4}{(\sqrt{3+k^2 \cdot 2} - k\sqrt{2})^2} \\ k \geq 1; & \quad \frac{p_{H,u} \cdot \delta^2}{\sigma_{BZ}} = \frac{k^2 \cdot 8}{\left(\sqrt{3 + \frac{1}{k^2 \cdot 2}} - \frac{1}{k\sqrt{2}}\right)^2} \end{aligned} \quad (21)$$

c) allseits eingespannten Wandenden

$$\begin{aligned}
 k \leq 1; \quad & \frac{P_{H,u} \cdot \delta^2}{\sigma_{BZ}} = \frac{8}{(\sqrt{3+k^2} - k)^2} \\
 k \geq 1; \quad & \frac{P_{H,u} \cdot \delta^2}{\sigma_{BZ}} = \frac{8 \cdot k^2}{\left(\sqrt{3 + \frac{1}{k^2}} - \frac{1}{k}\right)^2}
 \end{aligned} \tag{22}$$

Die Bedingung $b_r \geq a_r$ in der Gleichung (19) in Abschnitt 7.2 braucht hier nicht erfüllt zu werden, da dies in der Bereichsabgrenzung für $k \leq 1$ bereits berücksichtigt wurde; a und b können also beliebige Werte annehmen.

Das Bild 17 zeigt die auf diesem Wege ermittelten Traglastkurven in einer

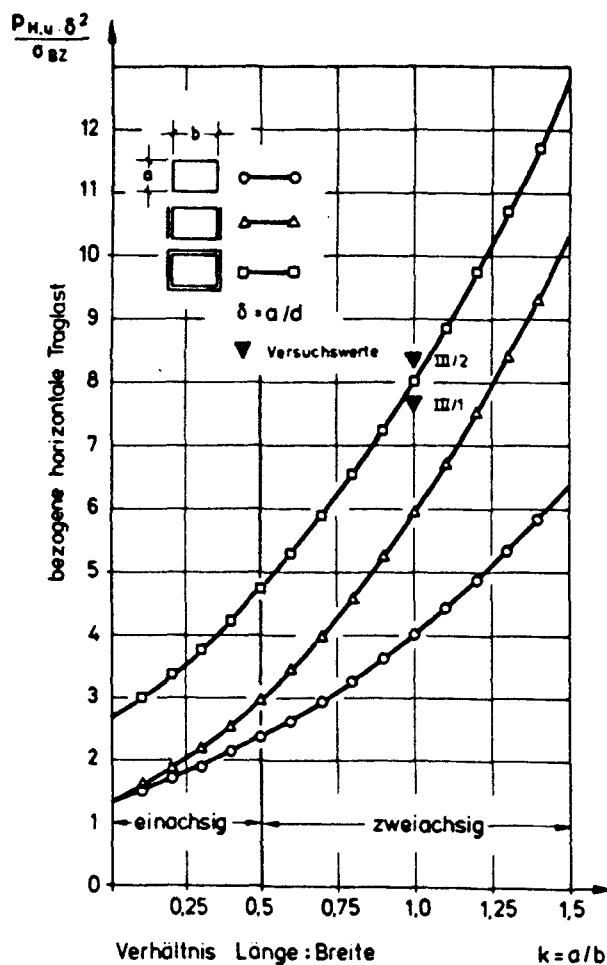


Bild 17: Traglastkurven von kreuzweise biegebeanspruchten Wänden

Graphik, in dem die bezogenen horizontalen Traglasten über den Seitenverhältniszahlen $k = a/b$ aufgetragen sind. Man erkennt aus Bild 17, welche bedeutende Laststeigerung durch Übergang vom einachsigen zum kreuzweisen Lastabtrag - in Abhängigkeit vom Verhältnis Länge zu Höhe der Wand - erreicht werden kann.

Die in den Versuchen III/1 und III/2 gemessenen horizontalen Traglasten sind in bezogener Schreibweise unter Zugrundelegung der in Tabelle 14 wiedergegebenen Biegezugfestigkeitswerte parallel zu den Lagerfugen in das Bild 17 mit eingetragen worden. Es wurde allseits eingespannte Lagerung der Ränder unterstellt. Man erkennt, daß die Übereinstimmung zwischen gemessenen und rechnerisch ermittelten Werten gut ist.

Allerdings muß darauf aufmerksam gemacht werden, daß die Anwendung der Bruchlinientheorie als eine erste Näherung anzusehen ist: da die in unterschiedlicher Weise zu berechnenden Bruchmomente senkrecht und parallel zur Lagerfuge unter Berücksichtigung der vertikalen Auflast nur durch Mittelung in die Berechnung eingehen, ist die systemgerechte Anwendung dieses Rechenverfahrens durchaus begrenzt. Weiterhin ist die Richtigkeit des Rechenergebnisses abhängig von der Kenntnis der Biegezugfestigkeit. Im Hinblick auf eine konservative Abschätzung der horizontalen Traglast einer vierseitig gelagerten Mauerwerkswand ist eine Anwendung der Bruchlinientheorie jedoch als sinnvoll anzusehen, zumal die Anwendung anderer Rechenverfahren, wie z.B. die Kreuzstreifenmethode /2/, zu noch geringeren horizontalen Traglasten führt.

8.0 Zusammenfassung

Der Fehlbestand an Schutzplätzen in der Bundesrepublik Deutschland einerseits und die lokale Konzentration der vorhandenen Schutzräume andererseits geben Anlaß, die vorhandene Bausubstanz mit fast ausschließlich aus Mauerwerk bestehenden Kellerwänden auf ihre Tragfähigkeit zu untersuchen und zu prüfen, inwieweit es möglich ist, diese Wände aus Mauerwerk mit angemessenem Aufwand so zu verstärken, daß die Forderungen des Grundschutzes erfüllt werden.

Voraussetzungen hierfür ist die Kenntnis des Werkstoffgesetzes und die Entwicklung eines statischen Tragmodells zur nachträglichen wirklichkeitsnahen Abschätzung der Biegetragfähigkeit druckbeanspruchter Wände aus Mauerwerk mit beliebigen Abmessungen.

In diesem Forschungsvorhaben wurde deshalb das Trag- und Verformungsverhalten von Mauerwerk unter definierten Auflasten und Randbedingungen untersucht. Dafür mußten - außer einem geeigneten Prüfstand - Wände und andere Prüfkörper aus Mauerwerk neu hergestellt werden, und zwar so, daß sie die Eigenschaften realer alter Bausubstanz besitzen.

Hierzu wurden in Abbruch-Bauten, die in der Zeit zwischen 1850 und 1930 errichtet wurden, Ziegel entnommen; Lochziegel und Kalksandsteine waren damals noch nicht gebräuchlich. Aus chemischen Analysen wurde der Bindemittelgehalt des alten Mörtels bestimmt, der jedoch für die neu aufzumauernden Wände wegen der heute bei gleichem Bindemittelgehalt erreichbaren höheren Mörtelfestigkeiten erheblich reduziert werden mußte, um die Eigenschaften alter Bausubstanz zu erzielen.

Es wurden Untersuchungen an 14 Wänden durchgeführt und hierbei eine Vielzahl von Parametern variiert. Daneben konnte an zusätzlich hergestellten kleineren Mauerwerkskörpern das Last-Verformungsverhalten (σ - ϵ -Arbeitslinie) studiert werden, um Grundlagen für die rechnerische Abschätzung der Traglasten zu schaffen.

Bei der Prüfung der Traglast wurden bei horizontal wirkendem, stufenweise erhöhtem Druck und vertikaler konstanter Belastung die Durchbiegung und die Krümmung an mehreren Stellen der Wandoberfläche mit Hilfe elektro-mechanischer Wandler erfaßt. Die Vertikallast wurde stets als erste Belastungsgröße auf das Mauerwerk aufgebracht und während aller Horizontal-druckstufen konstant gehalten. Bei diesen Untersuchungen war durch die Veränderung der Wandkrümmung erwartungsgemäß eine allmähliche Ausprägung eines Gelenkes durch Ribbildung in halber Wandhöhe - bei eingespannten Wänden auch am Kopf- und Fußpunkt - zu erkennen.

Bei bekanntem Last-Verformungsverhalten des Baustoffs "Mauerwerk" läßt sich die maximale Biegetragfähigkeit in Abhängigkeit von der Auflast rechnerisch ermitteln. Zu diesem Zwecke wurde ein Interaktionsdiagramm für bezogene Bruchschnittgrößen unter der Annahme von drei extrem unterschiedlichen Spannungs-Dehnungs-Gesetzen entwickelt. Es wurde deutlich, daß ein Stoffgesetz, das dem des Baustoffes Beton entspricht, die beste Übereinstimmung zwischen Meß- und Rechenwerten bringt.

Die Vorausberechnung der Biegetragfähigkeit beliebiger Wandkonstruktionen setzt die Kenntnis von Festigkeit und Verformungsverhalten des betreffenden Mauerwerks voraus, wobei zu dessen Bestimmung die Entnahme möglichst kleiner Materialproben erwünscht ist. Es besteht die Absicht, die Druckfestigkeit des Mauerwerks an Bohrkernen/Kleinprüfkörpern zu ermitteln und die Biegezugfestigkeit aus Normen, z.B. BS 5628 oder DS 438.15, zu entnehmen. Deshalb wurde die Druckfestigkeit nicht nur an kleinformatigen Prüfkörpern ermittelt, die aus Bohrkernen aus den Versuchswänden hergestellt worden sind, sondern auch an gleichzeitig mit den Versuchswänden aufgemauerten Versuchskörpern nach DIN 18 554; der Umrechnungsfaktor liegt je nach Mauerwerk zwischen 0,4 und 0,9. Zur Absicherung dieser Werte sind weitere Untersuchungen vorgesehen. Die charakteristischen Stauchungswerte sollen stets zu 2 und 3,5 ‰ angenommen werden.

Die wesentlichen Ergebnisse der an einachsige biegebeanspruchten Wänden durchgeführten Untersuchungen wurden in einem Traglastdiagramm dargestellt.

Soll das Tragvermögen von kreuzweise lastabtragenden Mauerwerkswänden untersucht werden, leistet hierfür die Bruchlinientheorie gute Dienste. Auf ihrer Grundlage wurde auch für vierseitig gelagerte Wände ein Traglastdiagramm entwickelt, mit dessen Hilfe eine Vielzahl von Bauteilparametern berücksichtigt werden kann. Dieses Diagramm dient zunächst zur groben Abschätzung der horizontalen Traglast.

Ein Sicherheitsabstand gegenüber Bruch kann am einfachsten durch einen Faktor berücksichtigt werden, beispielsweise:

- Reduzierung des Rechenwertes der Druckfestigkeit des Mauerwerks
- Reduzierung der rechnerischen Wandauflast
- Rechnerische Erhöhung der horizontalen Luftdruckbeanspruchung

Damit sind die Voraussetzungen für das ingenieurmäßige Verständnis des Tragverhaltens von Mauerwerkswänden gegenüber Horizontallasten gegeben.

Im Hinblick auf das Ziel dieser Untersuchungen, durch angemessene Ertüchtigung alter Bausubstanz aus Mauerwerk möglichst Grundschutz zu gewährleisten, kann festgestellt werden, daß

- kreuzweise lastabtragende Wände mit einem Höhen-Längen-Verhältnis von 1:1 in Gebäuden mit einem Obergeschoß (Keller und Erdgeschoß) und
- einachsig lastabtragende Wände - Höhen-Längen-Verhältnis kleiner 1:2 - in Gebäuden mit zwei Vollgeschossen (Keller, Erdgeschoß und ein Obergeschoß)

ohne weitere Zusatzmaßnahmen einen Horizontaldruck von 0,1 bar aufnehmen können; dynamische Einwirkungen sind hierbei zunächst noch nicht berücksichtigt.

Im Katastrophenfall muß jedoch davon ausgegangen werden, daß die vorgenannten Auflasten nicht mehr vorhanden sind. Daher müssen bei Schutzräumen die Umfassungswände aus Mauerwerk nachträglich durch geeignete Maßnahmen, z.B. durch Bewehren, ertüchtigt werden. Entwicklung und Erprobung entsprechender Verstärkungsmaßnahmen zur Erhöhung der Biegetragfähigkeit sollen Gegenstand des folgenden Forschungsabschnitts sein.

Literaturverzeichnis

- / 1/ Kordina, Westphal, Gunkler Untersuchungen zur Standsicherheit von Wänden in alter Bausubstanz unter Horizontaldruck
- / 2/ Schöner, W. Zur Biegetragfähigkeit von Mauerwerk unter Berücksichtigung axialer Auflasten
Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der TU Hannover
- / 3/ Furler, Thürlimann Tragverhalten von Mauerwerkswänden und Druck und Biegung
Bericht Nr. 109 aus dem Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Februar 1981
- / 4/ Merk Zivilschutz und Zivilverteidigung
Süddeutsche Verlagsanstalt, Mannheim
- / 5/ Zelger Schaffung von Grundlagen für die Bemessung von bewehrtem Mauerwerk
Materialprüfungsamt für das Bauwesen der TU München, Mai 1977 und Oktober 1980
- / 6/ Zelger Bewehrtes Bauwerk nach DIN 1053 Teil 3, Entwurf 1987
Mauerwerkskalender 1988
- / 7/ Technische Richtlinien - Bautechnische Grundsätze für Hausschutzräume des Grundschatzes (Fassung 1972), Bekanntmachung des Bundesministers für Städtebau und Wohnungswesen vom 10.02.1972; Az.: I - 7 - 81 10 12 - 1
- / 8/ Kordina, Quast Bemessung von schlanken Bauteilen - Knicksicherheitsnachweis
Betonkalender 1988
- / 9/ Mann Grundlagen für die ingenieurmäßige Bemessung von Mauerwerk nach DIN 1053 Teil 2
Mauerwerkskalender 1987
- /10/ Sawczuk, Jaeger Grenztragfähigkeits-Theorie der Platten
Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg 1963
- /11/ Reichenbach, Mayrhofer Dynamisches Tragverhalten von Mauerwerk bei horizontaler Belastung
- Abschlußbericht -
Ernst-Mach-Institut 1985
- /12/ Danish Standard DS 438.15 Teil 5 Ziegelmauerwerk
- /13/ British Standard BS 5628 (Mauerwerk)

VI

A N H A N G

zum Abschlußbericht
über die

**BIEGETRAGFÄHIGKEIT VON MAUERWERK MIT DEN
EIGENSCHAFTEN ALTER BAUSUBSTANZ UNTER
DRUCKBEANSPRUCHUNG**

Der Anhang umfaßt 85 Anlagen mit
 9 Tabellen und
 79 Bildern

VII

INHALTSVERZEICHNIS DER ANLAGEN

<u>Tabelle:</u>		<u>Anlage</u>
15	Mörtelanalysen: Lehre; Braunschweig-Ludwig-Winter-Straße	01
16	Mörtelanalysen: Kneitlingen; Braunschweig-Broitzem	01
17:	Mörtelanalysen: Braunschweig-Broitzem	02
18:	Zusammensetzung der Kleinversuchskörper	02
19:	Umfang der ergänzenden Untersuchungen an Norm-Prüfkörpern	03
20:	Ergebnisse der Mörtelprüfungen nach DIN 18 555 Teil 3	04
21:	Druckfestigkeit der Kleinprüfkörper	04
22:	Materialeigenschaften verwendeter Mauersteine	05
23:	Gemessene Druckzonenkennwerte an geschoß- hohen Wänden und Norm-Prüfkörpern	05
 <u>Bild:</u>		
18 :	Prüfstand für Wandstreifen - Querschnitt	06
19:	Prüfstand für Wandstreifen - Auflagerausbildung	07
20:	Prüfstand für Wandstreifen - Ansicht	08
21:	Prüfstand für kreuzweise lastabtragende Wände - Querschnitt	09
22:	Prüfstand für kreuzweise lastabtragende Wände - Ansicht	10
23:	Meßstellenbelegungsplan für die Wandstreifen I/1 bis I/5	11
24:	Meßstellenbelegungsplan für die Wandstreifen II/1 und II/2	12
25:	Meßstellenbelegungsplan für die Wandstreifen II/3 und II/6	13
26:	Meßstellenbelegungsplan für die Wandstreifen II/4; II/7 und II/8	14

VIII

<u>Bild:</u>		<u>Anlage</u>
27:	Meßstellenbelegungsplan für die Prüfwände III/1 und III/2	15
28 - 41:	Durchbiegungen der Mauerwerkswände	16 - 29
42 - 55:	Krümmungen der Mauerwerkswände	30 - 43
56 - 67:	Querschnittskenngößen der Mauerwerkswände	44 - 55
68 - 83:	Spannungs-Dehnungs-Linien geprüfter Norm-Prüfkörper	56 - 71
84:	Für Durchbiegungsberechnungen verwendete Materialgesetze	72
85 - 95:	Vergleich gemessener und gerechneter Durch- biegungen	73 - 83
96 - 97:	Rißbilder der Mauerwerkswände der Versuchs- serie III	84 - 85

A n a l y s e	Lehre		Braunschweig Ludwig-Winter-Str. I		Braunschweig Ludwig-Winter-Str. II	
Glühverlust 1000 °C	9,64	Lösliches, glühver- lustfrei Gew.-%	5,93	Lösliches, glühver- lustfrei Gew.-%	6,05	Lösliches, glühver- lustfrei Gew.-%
davon CO ₂	-		-		-	
Salzsäureunlösliches	72,76		82,64		83,21	
lösli. Kieselsäure (SiO ₂)	4,16	23,41	2,51	20,03	1,89	17,42
Eisen (Fe ₂ O ₃)	0,86	4,99	0,86	7,14	0,77	7,10
Aluminium (Al ₂ O ₃)	1,03	5,85	0,73	6,06	0,68	6,27
Titan (TiO ₂)	0,06	0,34	0,04	0,33	0,04	0,37
Calcium (CaO)	10,94	62,16	7,52	62,40	6,95	64,05
Magnesium (MgO)	0,25	1,42	0,20	1,66	0,36	3,32
Sulfat (SO ₃)	0,34	1,93	0,19	1,58	0,16	1,47
Summe ohne CO ₂	100,00	100,00	100,62	100,00	100,11	100,00
MISCHUNGSVERHÄLTNIS	Verfahren: DIN 52 170, Pisters, Hummel-Charisius					
nach Gewichtsteilen	1:4,26		1:7,06		1:7,90	
nach Raunteilen *)	1:2,95		1:4,89		1:5,46	
wahrscheinliches Bindemittel	hochhydraulischer Kalk		hochhydraulischer Kalk		hochhydraulischer Kalk	

*) Umrechnung als hydraulischer Kalk: $\rho = 0,9 \text{ kg/dm}^3$

Tabelle 15: Analyseergebnisse aus Gebäuden entnommener Mörtelproben

A n a l y s e	Braunschweig- Broitzem 5		Braunschweig- Broitzem 6		Kneitlingen	
Glühverlust 1000 °C	6,14	Lösliches, glühver- lustfrei Gew.-%	5,50	Lösliches, glühver- lustfrei Gew.-%	5,45	Lösliches, glühver- lustfrei Gew.-%
davon CO ₂	-		-		-	
Salzsäureunlösliches	81,65		83,17		84,45	
lösli. Kieselsäure (SiO ₂)	2,32	19,00	2,31	20,39	0,37	3,67
Eisen (Fe ₂ O ₃)	1,03	8,44	0,97	8,56	0,04	0,40
Aluminium (Al ₂ O ₃)	1,05	8,60	0,90	7,94	0,11	1,09
Titan (TiO ₂)	-	-	-	-	-	-
Calcium (CaO)	7,08	57,98	6,54	57,72	6,73	66,77
Magnesium (MgO)	0,45	3,69	0,30	2,65	2,75	27,28
Sulfat (SO ₃)	0,28	2,29	0,31	2,74	0,08	0,79
Summe ohne CO ₂	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
MISCHUNGSVERHÄLTNIS	Verfahren: DIN 52 170, Pisters, Hummel-Charisius					
nach Gewichtsteilen	1:6,75		1:6,95		1:7,1	
nach Raunteilen	1:5,19 1)		1:5,35 1)		1:3,3 2)	
wahrscheinliches Bindemittel	hochhydraul. Kalk oder Eisenportlandzement		hochhydraul. Kalk oder Eisenportlandzement		Dolomitischer Kalk	

1) Umrechnung als hochhydraul. Kalk: $\rho = 1,0 \text{ kg/dm}^3$

2) Umrechnung als Kalkhydrat: $\rho = 0,6 \text{ kg/dm}^3$

Tabelle 16: Analyseergebnisse aus Gebäuden entnommener Mörtelproben

Analyse	Braunschweig-Broitzem 1		Braunschweig-Broitzem 2		Braunschweig-Broitzem 3		Braunschweig-Broitzem 4	
Glühverlust 1000 °C	6,05	Lösliches, glühverlustfrei Gew.-%	6,01	Lösliches, glühverlustfrei Gew.-%	5,95	Lösliches, glühverlustfrei Gew.-%	5,54	Lösliches, glühverlustfrei Gew.-%
davon CO ₂	-		-		-		-	
Salzsäureunlösliches	82,93		82,80		82,31		83,63	
Lösl. Kieselsäure (SiO ₂)	2,43	20,97	2,09	18,68	2,55	21,45	2,24	20,29
Eisen (Fe ₂ O ₃)	0,82	7,07	0,83	7,42	0,82	6,89	0,80	7,25
Aluminium (Al ₂ O ₃)	0,75	6,47	0,80	7,15	0,77	6,48	0,75	6,79
Titan (TiO ₂)	0,04	0,34	0,03	0,27	0,04	0,34	0,04	0,36
Calcium (CaO)	6,95	59,97	6,81	60,85	7,09	59,63	6,53	59,15
Magnesium (MgO)	0,30	2,59	0,30	2,68	0,30	2,52	0,31	2,81
Sulfat (SO ₃)	0,30	2,59	0,33	2,95	0,32	2,69	0,37	3,35
Summe ohne CO ₂	100,57	100,00	100,00	100,00	100,15	100,00	100,21	100,00
MISCHUNGSVERHÄLTNIS	Verfahren: DIN 52 170, Pisters, Hummel-Charisius							
nach Gewichtsteilen	1:7,37		1:7,62		1:7,13		1:7,80	
nach Raumteilen *)	1:5,10		1:5,28		1:4,94		1:5,40	
wahrscheinliches Bindemittel	hochhydraulischer Kalk		hochhydraulischer Kalk		hochhydraulischer Kalk		hochhydraulischer Kalk	

*) Umrechnung als hydraulischer Kalk: $\rho = 0,90 \text{ kg/dm}^3$

Tabelle 17: Analyseergebnisse aus Gebäuden entnommener Mörtelproben

Bezeichnung	zugehöriger Hauptversuch	Steinsorte/Mörtelgruppe	Anzahl		
			Gestalt A	Gestalt B	Gestalt C
K I/3	I/3	Mz 12-1,6/II	-	-	12
K I/6	I/6	Mz 12-1,6/II	9	-	-
K II/2	II/2	KS 20-1,6/I	3	3	-
K II/7	II/7	HLz B 28-1,2/I	8	3	-

Tabelle 18: Zusammenstellung der Kleinversuchskörper

Bezeichnung	Steinsorte	Mörtel- gruppe	Prüfkörper- dicke (cm)	Erstellungsart		Belastungsart	
				aus MV-Wänden entnommen	separat auf- gemauert	zentrisch	exzentrisch
N 1/1.1	Mz 12-1,6-(RF)	MG 11	25	x		x	
N 1/2.1	Mz 12-1,6-(RF)	MG 11	25	x		x	
N 1/2.2	Mz 12-1,6-(RF)	MG 11	25	x		x	
N 1/3.1	Mz 12-1,6		25	x			x
N 1/4.1	Mz 12-1,6-(RF)	MG 11	12,5	x		x	
N 1/4.2	Mz 12-1,6-(RF)	MG 11	12,5	x		x	
N 1/4.3	Mz 12-1,6-(RF)	MG 11	12,5	x			x
N 1/5.1	Mz 12-1,6-(RF)	MG 11	12,5	x		x	
N 1/5.2	Mz 12-1,6-(RF)	MG 11	12,5	x			x
N 1/5.3	Mz 12-1,6-(RF)	MG 11	25	x			x
N 11/1.1	KS 20-1,6	MG 1	24	x			x
N 11/2.1-3	KS 20-1,6	MG 1	24		x	x	
N 11/2.4-6	KS 20-1,6	MG 1	24		x		x
N 11/3.1-2	KS 20-1,6	MG 1	17,5		x	x	
N 11/3.3	KS 20-1,6	MG 1	17,5		x		x
N 11/6.1	MLz B 28-1,2	MG 1	17,5		x		x
N 11/6.2-3	MLz B 28-1,2	MG 1	17,5		x	x	
N 11/7.1-2	MLz B 28-1,2	MG 1	24		x	x	
N 11/7.3	MLz B 28-1,2	MG 1	24		x		x
N 11/8.1-2	MLz B 28-1,2	MG 1	17,5		x		x
N 11/8.3	MLz B 28-1,2	MG 1	17,5		x	x	
N 11/9.1	Mz 12-1,6	MG 11	12,5	x		x	
N 111/1	Mz 12-1,8-(RF)	MG 1	25		x	x	
N 111/2	Mz 12-1,8-(RF)	MG 1	25		x	x	
N 111/3	Mz 12-1,8-(RF)	MG 1	25		x	x	
N 111/4	Mz 12-1,8-(RF)	MG 1	25		x		x
N 111/2.1	Mz 20-1,8-(RF)	MG 1	25		x		
N 111/2.2	Mz 20-1,8-(RF)	MG 1	25		x		
N 111/2.3	Mz 20-1,8-(RF)	MG 1	25		x		
N 111/2.4	Mz 20-1,8-(RF)	MG 1	25				

Tabelle 19: Umfang der ergänzenden Untersuchungen an Norm-Prüfkörpern

Mörtel zu Wand-Nr.	Prüfungen von Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit (MN/m ²)												Mörtelgruppe DIN 1053 T 1 Tabelle 7
	ϵ_{28}	$\sigma_{D,m0}$	$\sigma_{BZ,m0}$	ϵ_{NV}	$\sigma_{D,m0}$	$\sigma_{BZ,m0}$	ϵ_{NV}	$\sigma_{D,m0}$	$\sigma_{BZ,m0}$	ϵ_{KV}	$\sigma_{D,m0}$	$\sigma_{BZ,m0}$	
I/1	28	2,91	0,79	55	2,77	1,11	126	2,60	1,06	-	-	-	II
I/2	28	4,42	1,65	54	4,58	1,48	147	4,49	1,58	-	-	-	II
I/3	28	4,87	1,71	240	5,33	1,66	435	4,90	1,57	435	4,90	1,57	II
I/4	28	4,92	1,85	51	4,94	1,71	185	4,94	1,68	-	-	-	II
I/5	28	4,83	1,69	54	4,99	1,64	191	5,51	1,71	-	-	-	II
II/1	28	0,23	0,11	66	0,21	0,11	260	0,20	0,03	260	0,20	0,03	I
II/2	28	0,21	0,12	70	0,21	0,03	100	0,20	0,04	259	0,18	0,07	I
II/3	28	0,22	0,12	78	0,17	0,04	105	0,19	0,04	-	-	-	I
II/4	28	0,22	0,12	74	0,22	0,06	109	0,21	0,06	-	-	-	I
II/6	28	0,22	0,12	78	0,18	0,05	112	0,17	0,04	-	-	-	I
II/7	28	0,22	0,14	58	0,22	0,04	115	0,20	0,04	161	0,21	0,04	I
II/8	28	0,19	0,12	62	0,16	0,06	120	0,15	0,05	-	-	-	I
II/9	28	4,63	1,65	-	-	-	450	4,89	1,47	450	4,85	1,40	II
III/1	28	0,46	0,22	65	0,32	0,19	89	0,30	0,12	104	0,25	0,14	I
III/2	28	0,40	0,19	66	0,41	0,21	67	0,41	0,21	-	-	-	I

Tabelle 20: Ergebnisse der Mörtelprüfungen nach DIN 18 555 Teil 3

Bezeichnung	Mauerwerk/MG	Gestalt	Prüfkörperanzahl	h/b	Mittelwert Rohdichte [kg/dm ³]	Lochanteil [%]	Druckfestigkeit		
							Mittelwert \bar{f} [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]	Variationskoeffizient [-]
I/3	Mz 12-1,6-(RF)/II	C	12	1,14	1,58	-	16,43	$\pm 2,26$	0,138
I/6	Mz 12-1,6-(RF)/II	A	7	1,08	1,84	-	21,35	$\pm 1,88$	0,088
I/6	Mz 12-1,6-(RF)/II	A	1	1,08	1,79	-	23,67 ¹⁾	-	-
I/6	Mz-12-1,6-(RF)/II	A	1	2,14 ²⁾	1,90	-	14,86	-	-
II/2	KS 20-1,6/I	A	3	1	-	-	17,92	$\pm 0,94$	0,05
II/2	KS 20-1,6/I	B	3	1	-	-	16,07	$\pm 1,07$	0,07
II/7	HLz B 28-1,2/I	A	8	1,02	-	36,4	5,43	$\pm 0,783$	0,144
II/7	HLz B 28-1,2/I	B	3	1	-	31,1	6,00	$\pm 0,535$	0,089

1) Belastungsgeschwindigkeit nach DIN 18 554: $v = 0,07 \text{ N/mm}^2/\text{sec}$.

2) 2 Prüfkörper übereinandergestellt

Tabelle 21: Druckfestigkeitswerte der Kleinprüfkörper

Steinart	Abmessungen (Mittelwert) (mm)			Formatbe- zeichnung	Querschnitts- ausbildung	Rohdichte (Mittelwert) (kg/dm³)	Druckfestigkeit (MN/m²)		Mittel- wert $\bar{\sigma}_s$	Variat.- koeff. $V(x)$ (%)	Bezeichnung
	L	B	H				min	max			
Vollziegel (Reichsformat)	251	123	66	1 NF (Reichsf.)	Vollsteine	1,51	15,5	24,7	20,4	18,3	Mz-12-1,6-(RF)
	257	127	66			1,71	19,5	35,9	28,0	21,2	Mz 12-1,8-(RF)
	257	125	65			1,72	20,2	42,4	31,6	20,1	Mz-20-1,8-(RF)
	255	124,5	66			1,63	13,0	42,5	24,1	36,0	Mz-12-1,8-(RF)
	253	121	67			1,77	21,8	36,2	25,9	18,1	Mz-20-1,8-(RF)
Hochloch- ziegel	242	175	113	3 DF	Hochlochziegel Lochfläche 33,5 %	1,11 (1,71)2)	35,4	37,1	36,3	1,7	HLz B-28-1,2-3DF
	240	118	113	2 DF	Hochlochziegel Lochfläche 19,4 %	1,29 (1,64)2)	30,7	37,5	35,4	7,7	HLz B-28-1,2-2DF
Kalksand- steine	240	175	114 ¹⁾	3 DF	ovales Griffloch 102 x 42 mm	1,63	24,7	27,7	26,3	4	KS-20-1,6-3DF
	240	115	114	2 DF	ovales Griffloch 92 x 24 mm	1,65	23,2	26,9	25,1	5	KS-20-1,6-2DF

1) hier wurde teilweise ein vom Griffloch ausgehender RiB über die gesamte Steinhöhe festgestellt

2) Scherbenrohddichte

Tabelle 22: Materialeigenschaften verwendeter Mauersteine

Versuch	Material	Wand- dicke (cm)	NV bei zentrischer Belastung			NV bei exzentrischer Belastung			Wandversuche Messung in halber Wandhöhe ⁵⁾		
			$\bar{\sigma}_s$ (MN/m²)	ϵ_{su} (%)	$\bar{\epsilon}_{mw}$ (MN/m²)	$\bar{\sigma}_s(d)$ (MN/m²)	$\bar{\sigma}_s(x)$ (MN/m²)	ϵ_{su} (%)	σ_D (%)	σ_Z (%)	x (cm)
1/1	Mz 12-1,6-(RF) MG II	25	7,4	-2,4	5466,7	6,81 ²⁾	7,41 ²⁾	-2,36 ²⁾	-5,19	12,34	7,40
1/2		25	9,65	-1,375	8409,5	6,81 ²⁾	7,41 ²⁾	-2,36 ²⁾	-3,02	6,28	8,10
1/3		25	8,90 ¹⁾	-1,72 ¹⁾	7428 ¹⁾	6,81	7,41	-2,36	-5,45	22,26	4,91
1/4		12,5	15,32	-2,00	9470	7,66	10,52	-4,67	-0,75	1,89	3,54
1/5		12,5	10,51	-1,31	8750	8,08	12,24	-4,33	-1,42	2,00	5,19
11/1	KS 20-1,6 MG I	24	6,91 ³⁾	-3,48 ³⁾	4136,8 ³⁾	4,61	-	-3,77	-0,56	2,63	4,21
11/2		24	6,91	-3,48	4136,8	4,71	5,72	-4,35	-3,02	5,52	8,48
11/3		17,5	7,26	-2,35	4840,05	5,64	5,89	-5,50	-3,25	3,82	8,04
11/4		17,5	7,26 ⁴⁾	-2,35 ⁴⁾	4840,05 ⁴⁾	5,64	5,89 ⁴⁾	-5,00 ⁴⁾	-2,97	3,41	8,14
11/6	HLz B 28-1,2 MG I	17,5	6,48	-1,54	7344,6	3,84	-	-2,80	-2,69	4,29	6,74
11/7		24	5,52	-1,02	8260	4,12	4,45	-1,71	-0,33	5,24	1,405
11/8		17,5	6,09	-1,27	9666,7	4,94	5,41	-2,93	-1,26	5,72	15,83

1) Mittel aus NV-Versuchen 1/1 - 1/2

2) aus NV-Versuch 1/3

3) aus NV-Versuch 11/2

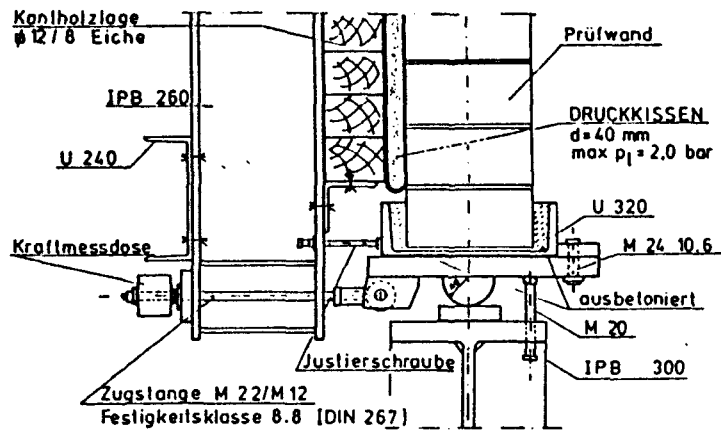
4) aus NV-Versuch 11/3

5) ohne eine eventuell zu berücksichtigende Putzschicht

Tabelle 23: Gemessene Druckzonenkennwerte an geschoßhohen Wänden und Norm-Prüfkörpern

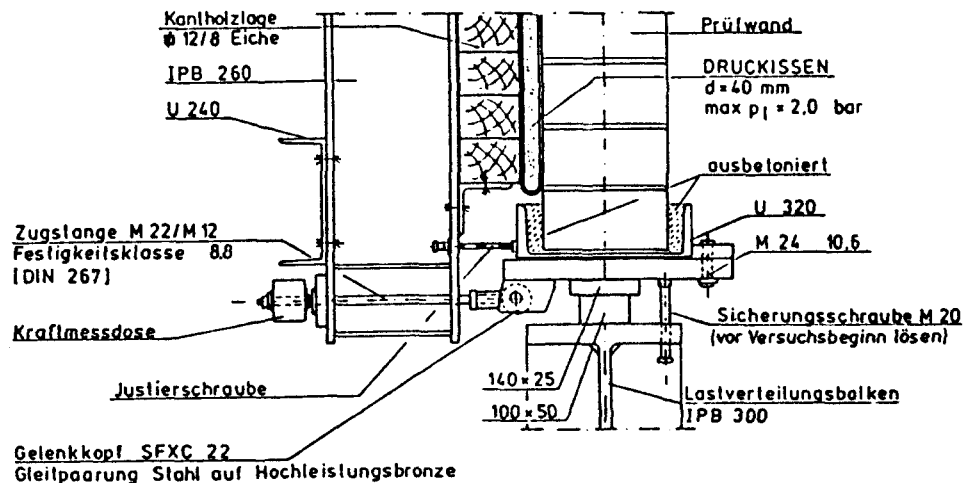
Belastungseinrichtung zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit von Mauerwerk

AUFLAGERAUSBILDUNG



Auflagerdetail:

gelenkige Lagerung (jeweils oben und unten ausführen)



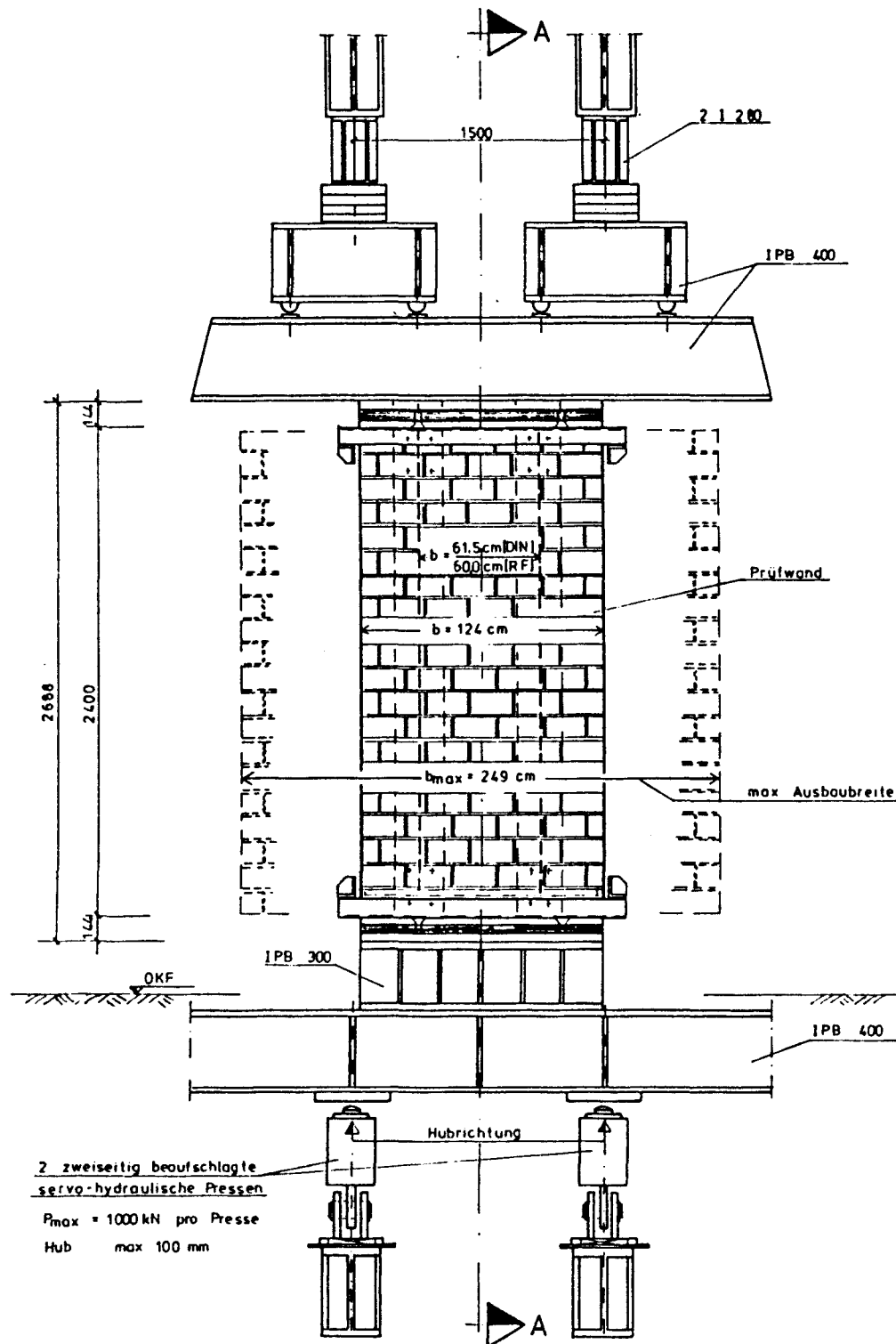
Auflagerdetail:

Einspannung (jeweils oben und unten ausführen)

Bild 19: Prüfstand für Wandstreifen - Auflagerausbildung

Belastungseinrichtung zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit von Mauerwerk

ANSICHT



Schnitt B-B

alle Maße in [mm]

Bild 20: Prüfstand für Wandstreifen - Ansicht

Anlage 8 zum
Untersuchungs-
bericht

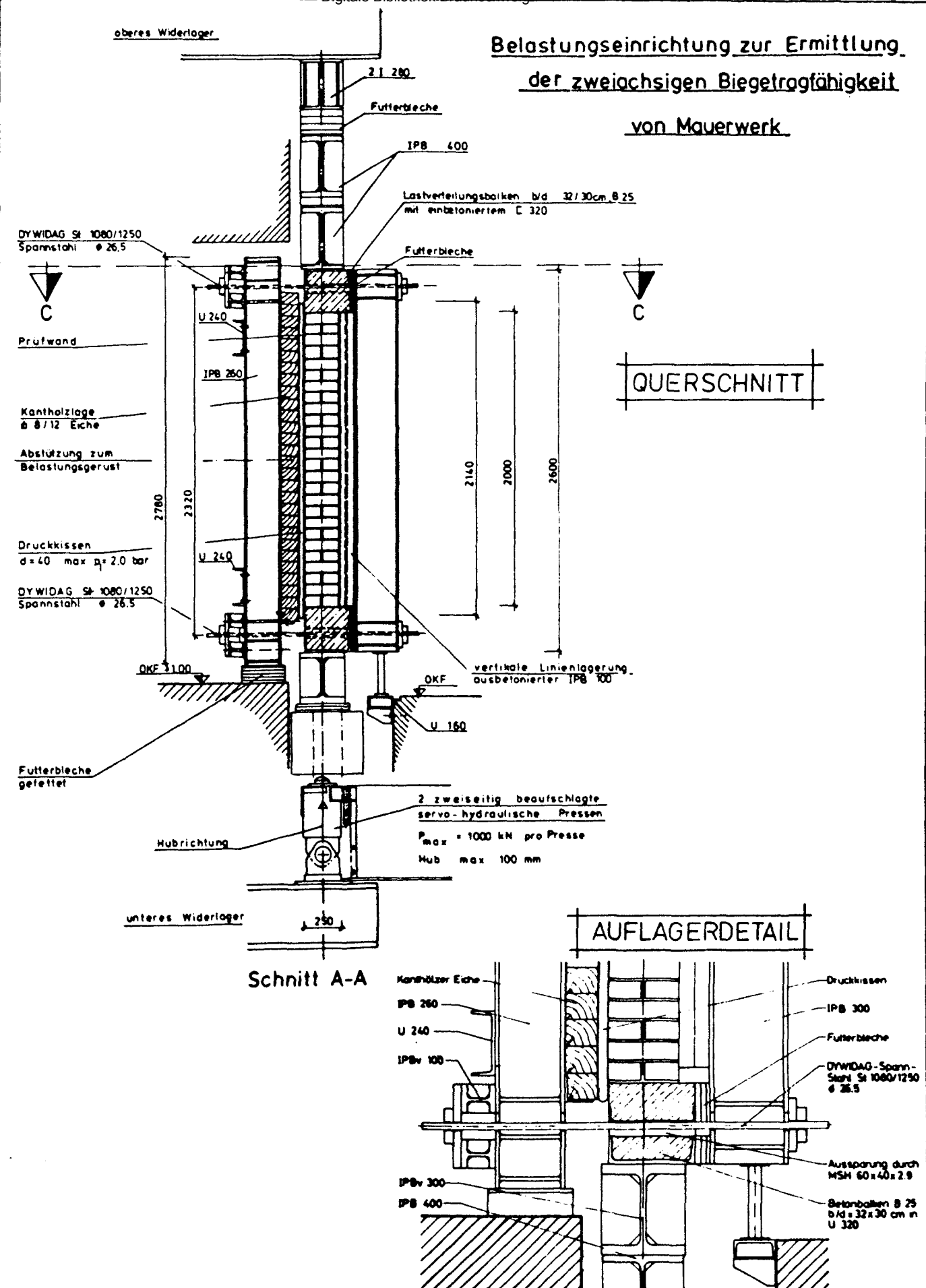


Bild 21: Prüfstand für kreuzweise lastabtragende Wände
- Querschnitt -

Belastungseinrichtung zur Ermittlung der zweiachsigen Biegetragfähigkeit von Mauerwerk

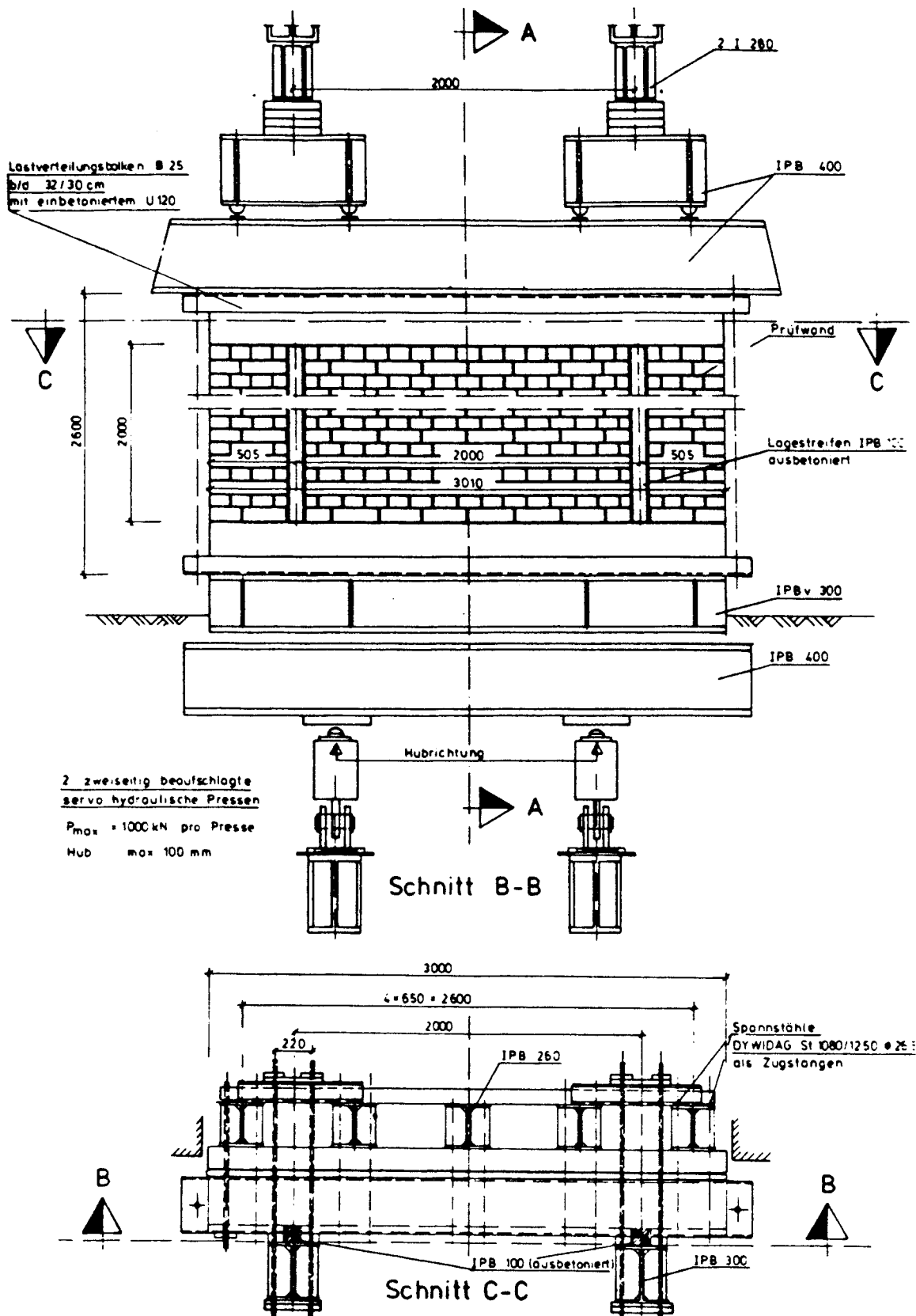


Bild 22: Prüfstand für kreuzweise lastabtragende Wände
- Ansicht -

Meßstellen – Belegungsplan

für die Versuche

I/1, I/2, I/3 (d = 25 cm, RF)

I/4, I/5 (d = 12,5 cm, RF)

gelenkige Lagerung

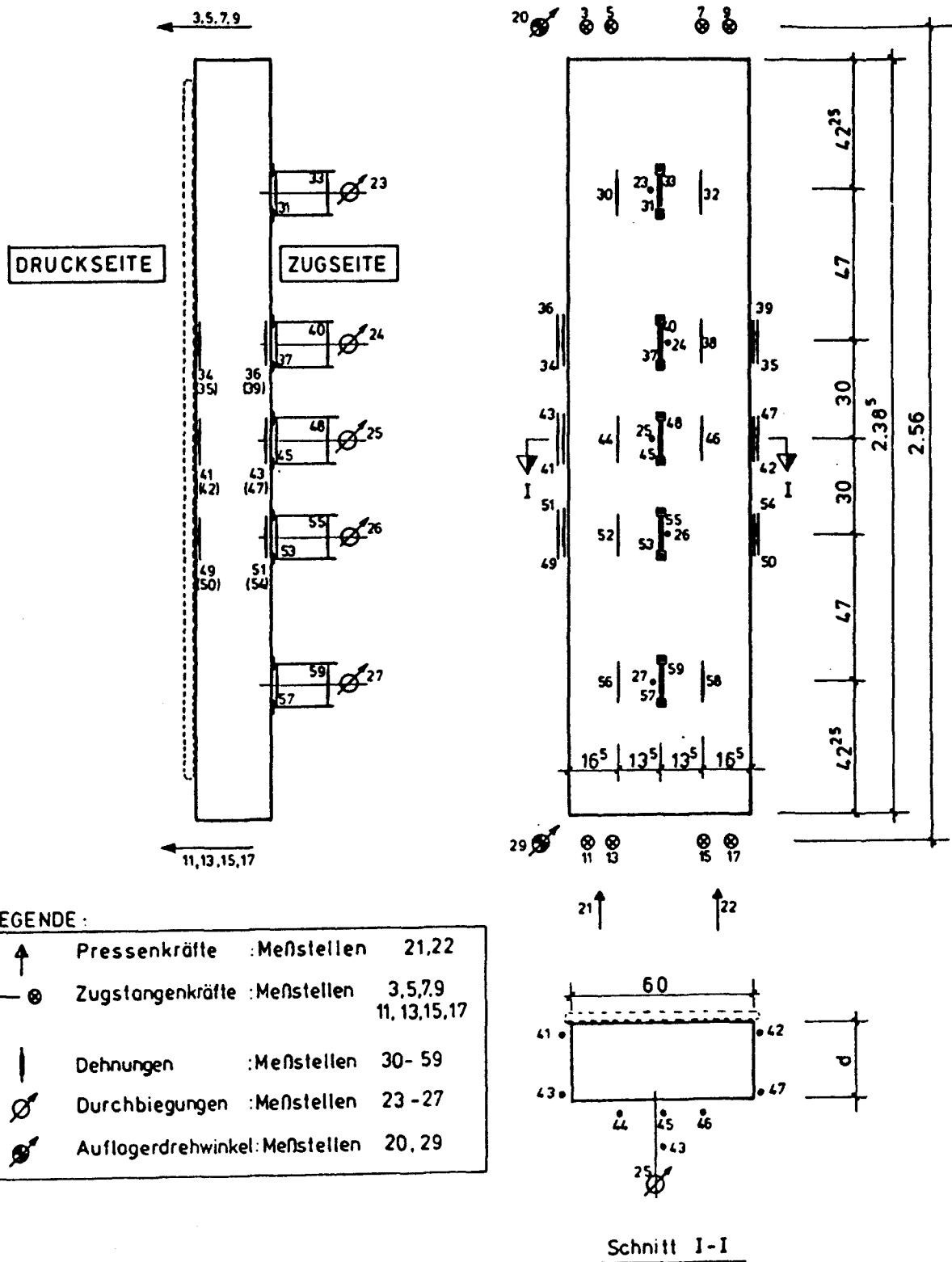


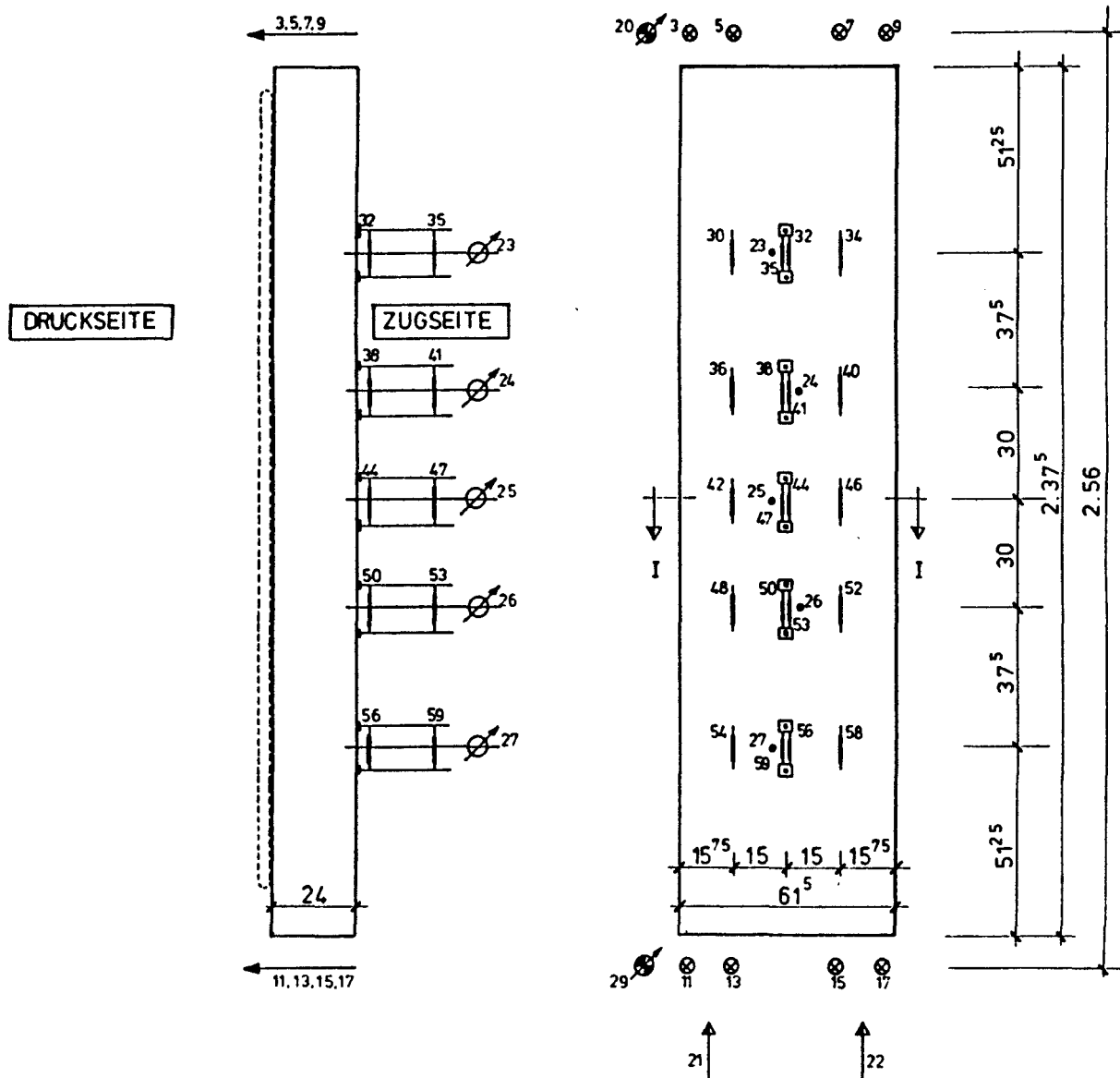
Bild 23: Meßstellenbelegungsplan für die Wandstreifen I/1 bis I/5

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 11 zum
Untersuchungs-
bericht

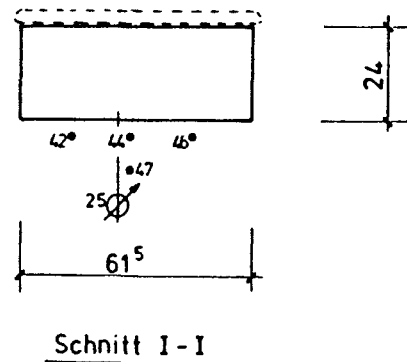
Nr. B I 7 810787 - 6

Meßstellen-Belegungsplan
 für die Versuche II/1, II/2 (d=24 cm, DIN-Format)
 gelenkige Lagerung



LEGENDE:

	Pressenkräfte	Meßstellen	21, 22
	Zugstangenkräfte	Meßstellen	3, 5, 7, 9 11, 13, 15, 17
	Dehnungen	Meßstellen	30, 32, 34-36, 38 44, 46-48, 50,
	Durchbiegungen	Meßstellen	23-27
	Auflagerdrehwinkel	Meßstellen.	20, 29



Schnitt I - I

Bild 24: Meßstellenbelegungsplan für die Wandstreifen
 II/1 und II/2

Anlage 12 zum
 Untersuchungs-
 bericht

Nr. B I 7 810787 - 6

Meßstellen - Belegungsplanfür die Versuche II/7 ($d = 24 \text{ cm}$), II/4, II/8 ($d = 17,5 \text{ cm}$)

DIN-Format, gelenkige Lagerung

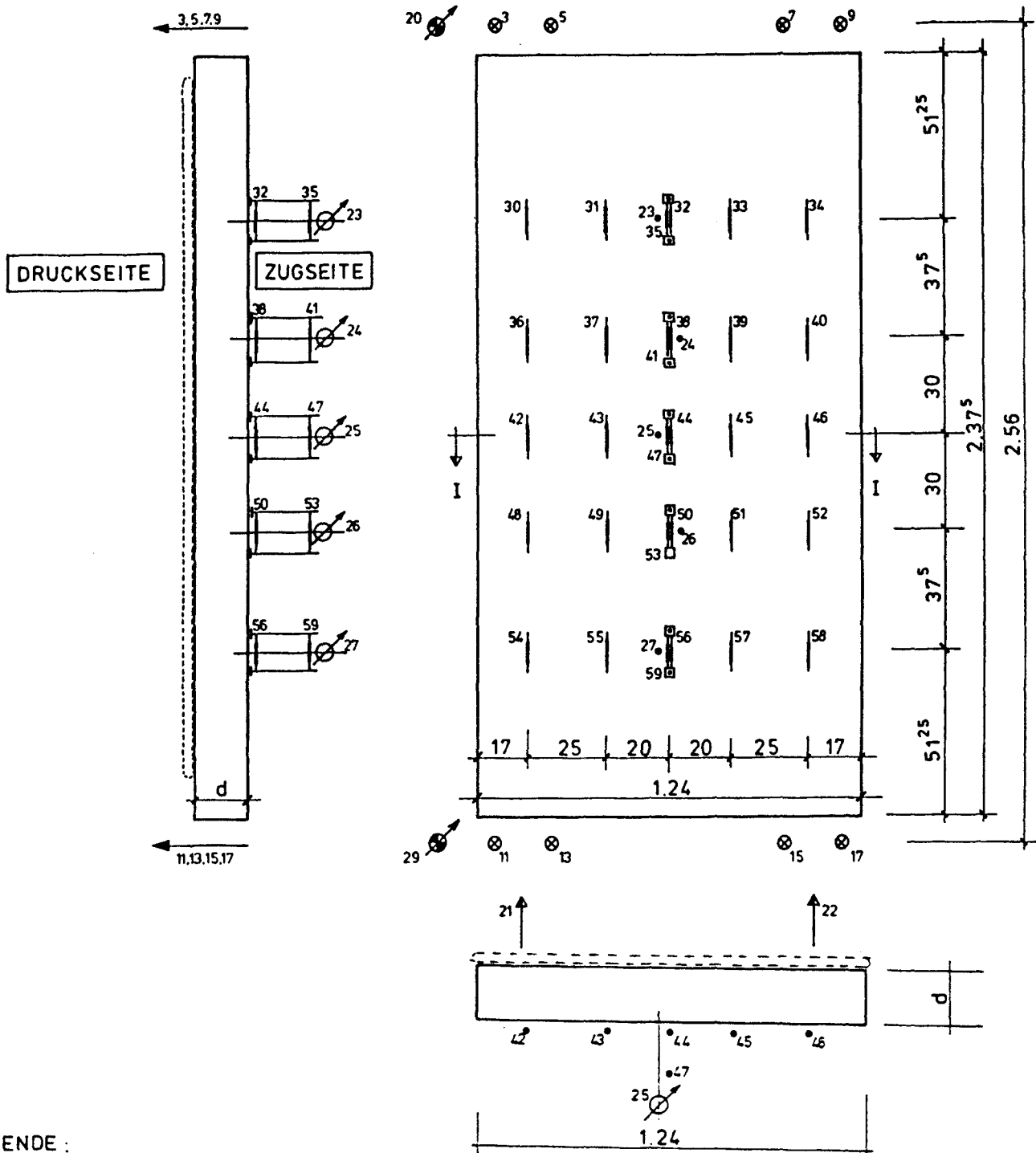
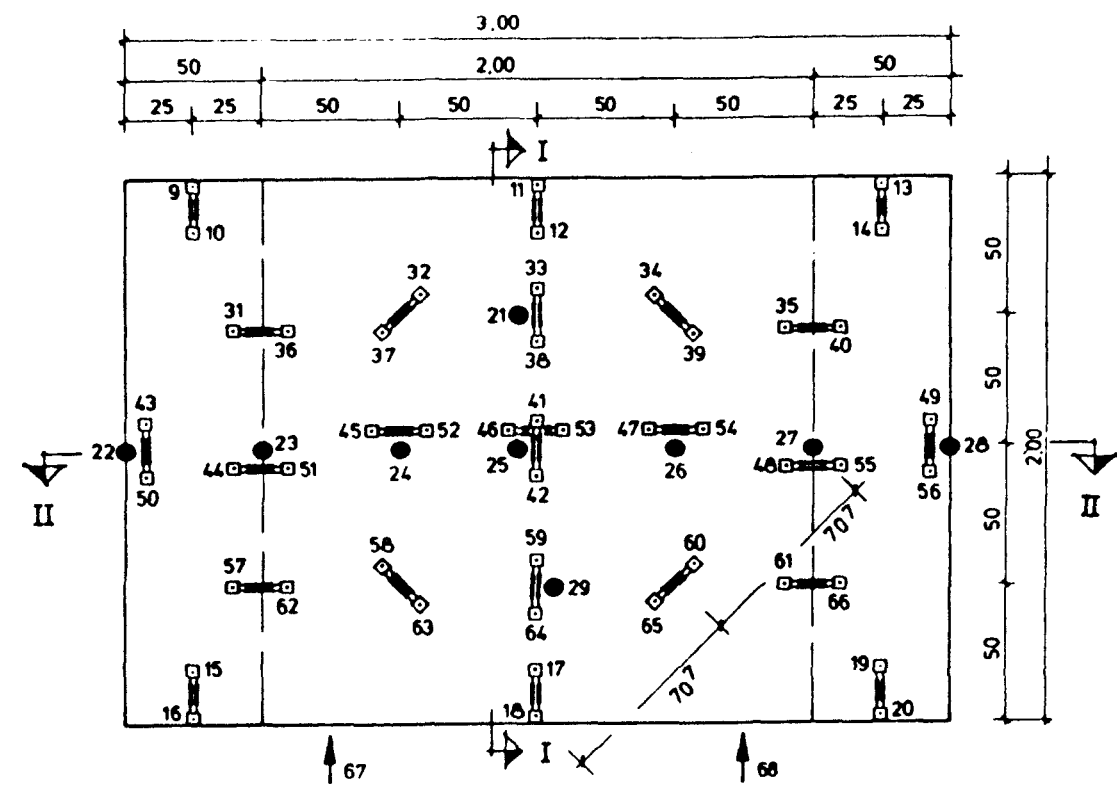
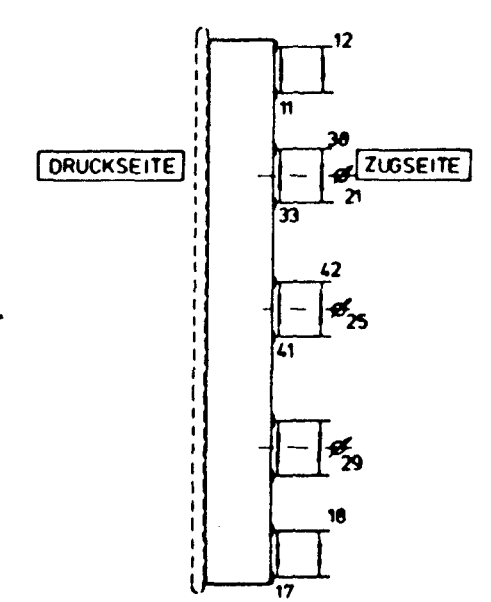


Bild 26: Meßstellenbelegungsplan für die Wandstreifen II/4; II/7 und II/8

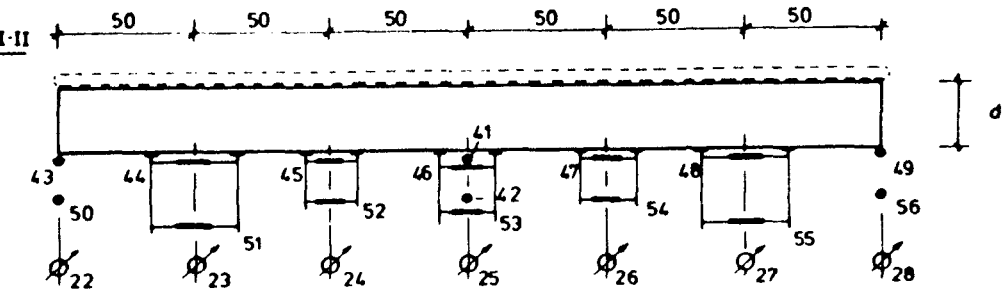
Meßstellen-Belegungsplan für die Versuche III/1, III/2



SNITT I-I



SNITT II-II



LEGENDE

	Durchbiegungen	Meßstellen	21-29
	Pressenkraft	Meßstellen	67, 68
	Dehnungen	Meßstellen	9-20, 31-66

Bild 27: Meßstellenbelegungsplan für die Prüfwände III/1 und III/2

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 15 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. 817 810787 - 6

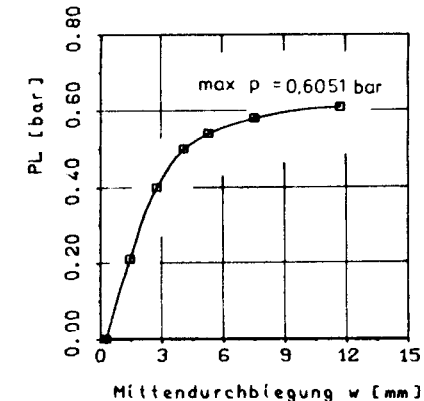
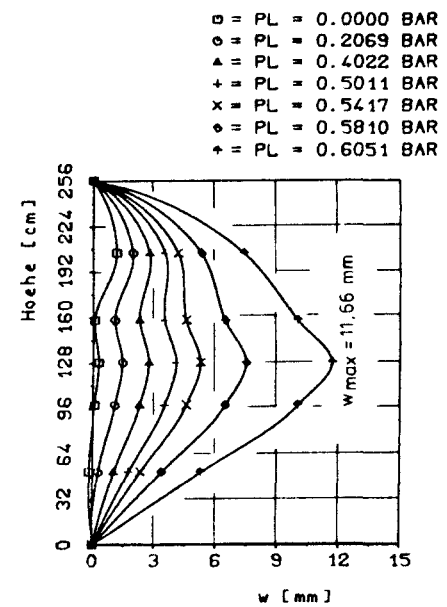
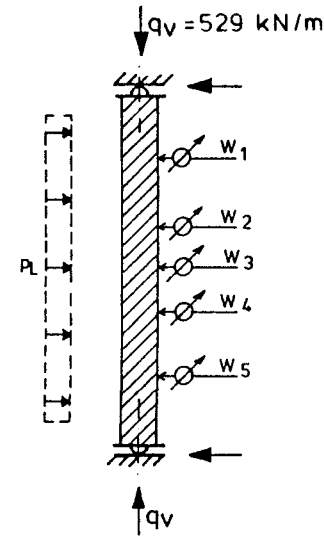
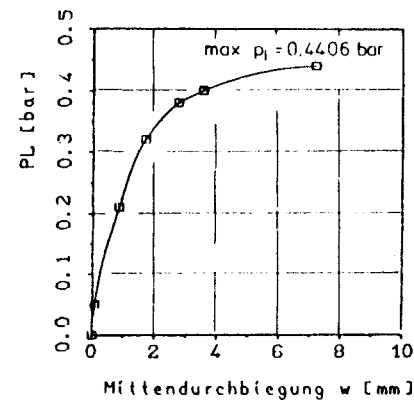
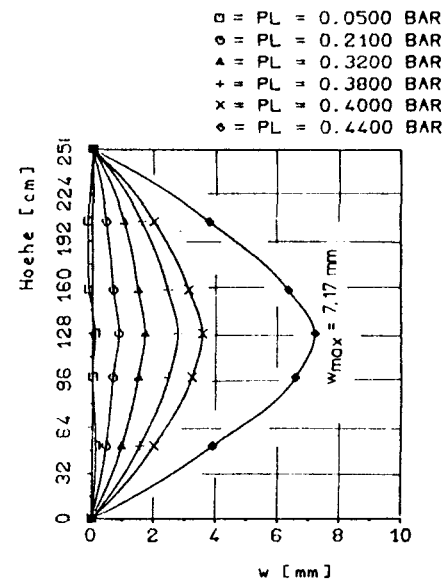
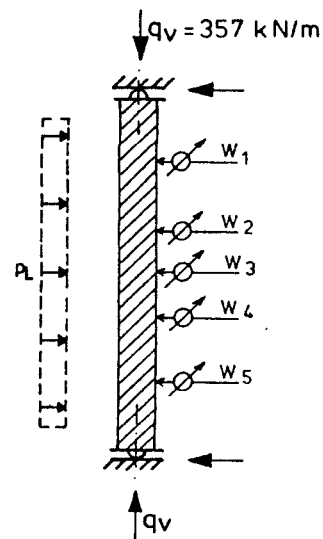


Bild 28: Durchbiegungen der Mauerwerkswand I/1

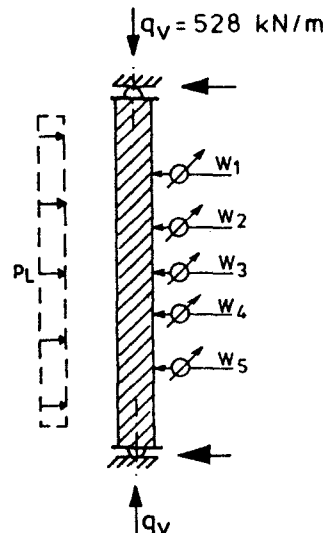
Anlage 16 zum
 Untersuchungs-
 bericht
 Nr. B I 7 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
 der Technischen Universität Braunschweig

Bild 29: Durchbiegungen der Mauerwerkswand I/2

Anlage 17 zum
 Untersuchungs-
 bericht
 Nr. B I 7 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
 der Technischen Universität Braunschweig



- = $p_L = 0.0000 \text{ BAR}$
- = $p_L = 0.3620 \text{ BAR}$
- △ = $p_L = 0.5521 \text{ BAR}$
- + = $p_L = 0.6022 \text{ BAR}$
- x = $p_L = 0.6261 \text{ BAR}$

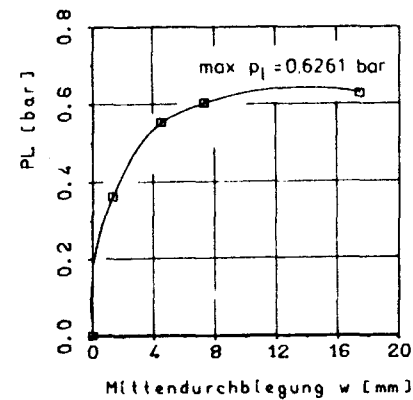
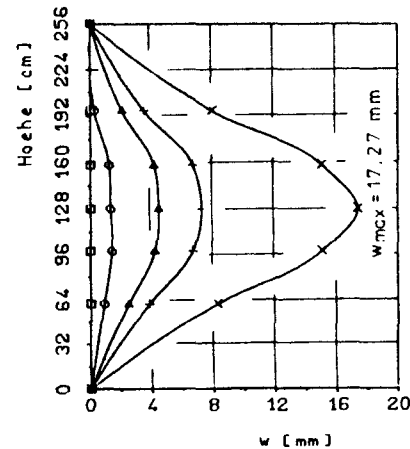
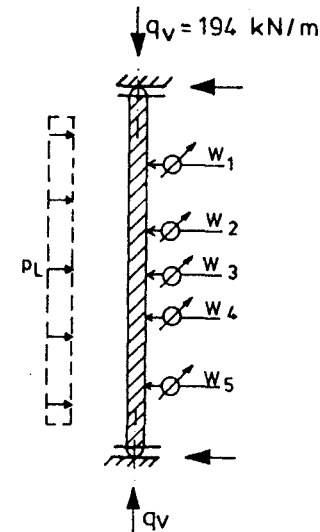


Bild 30: Durchbiegungen der Mauerwerkswand I/3

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 18 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6



- = $p_L = 0.0000 \text{ BAR}$
- = $p_L = 0.0142 \text{ BAR}$
- △ = $p_L = 0.0226 \text{ BAR}$
- + = $p_L = 0.0429 \text{ BAR}$
- x = $p_L = 0.0536 \text{ BAR}$
- ◆ = $p_L = 0.0612 \text{ BAR}$
- ⊕ = $p_L = 0.0697 \text{ BAR}$
- x = $p_L = 0.0729 \text{ BAR}$

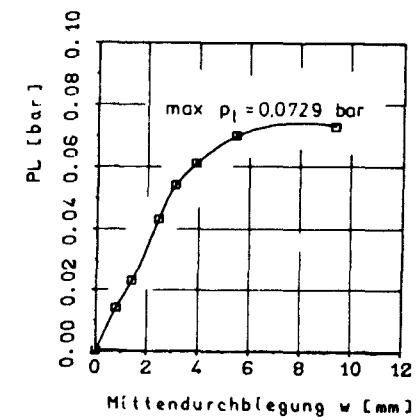
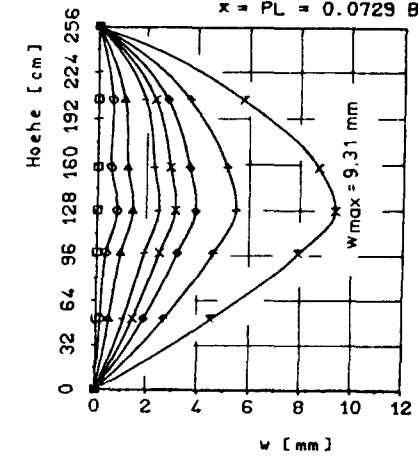


Bild 31: Durchbiegungen der Mauerwerkswand I/4

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 19 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

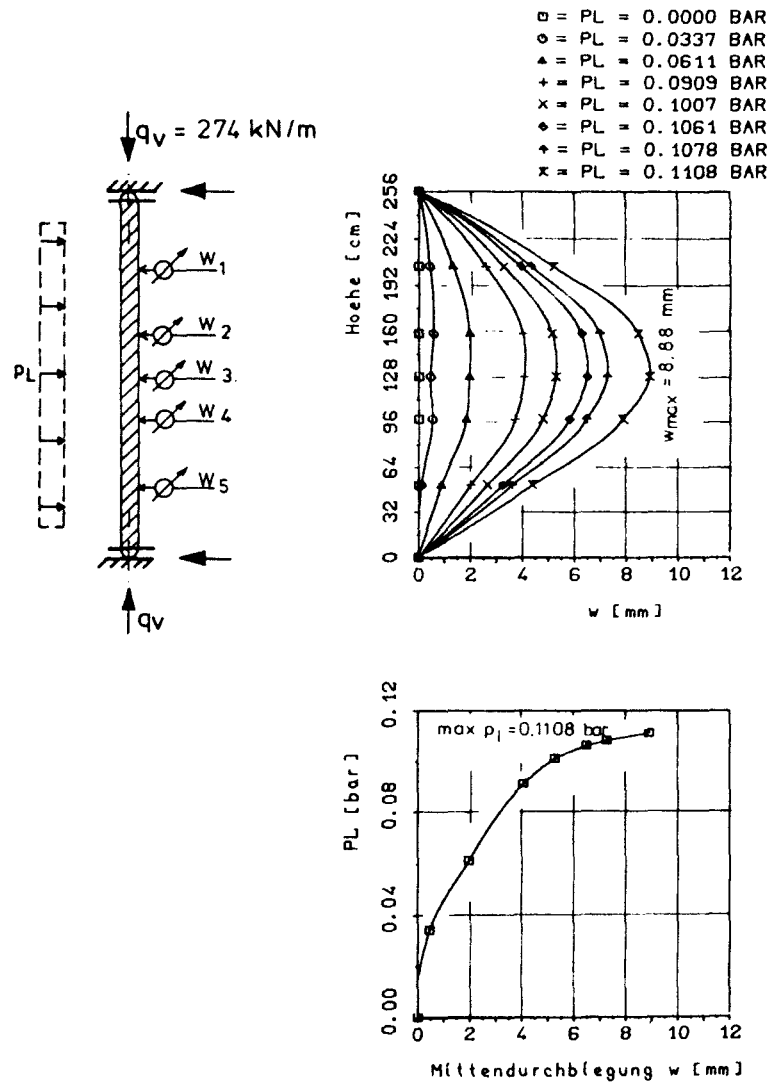


Bild 32: Durchbiegungen der Mauerwerkswand I/5

Anlage 20 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

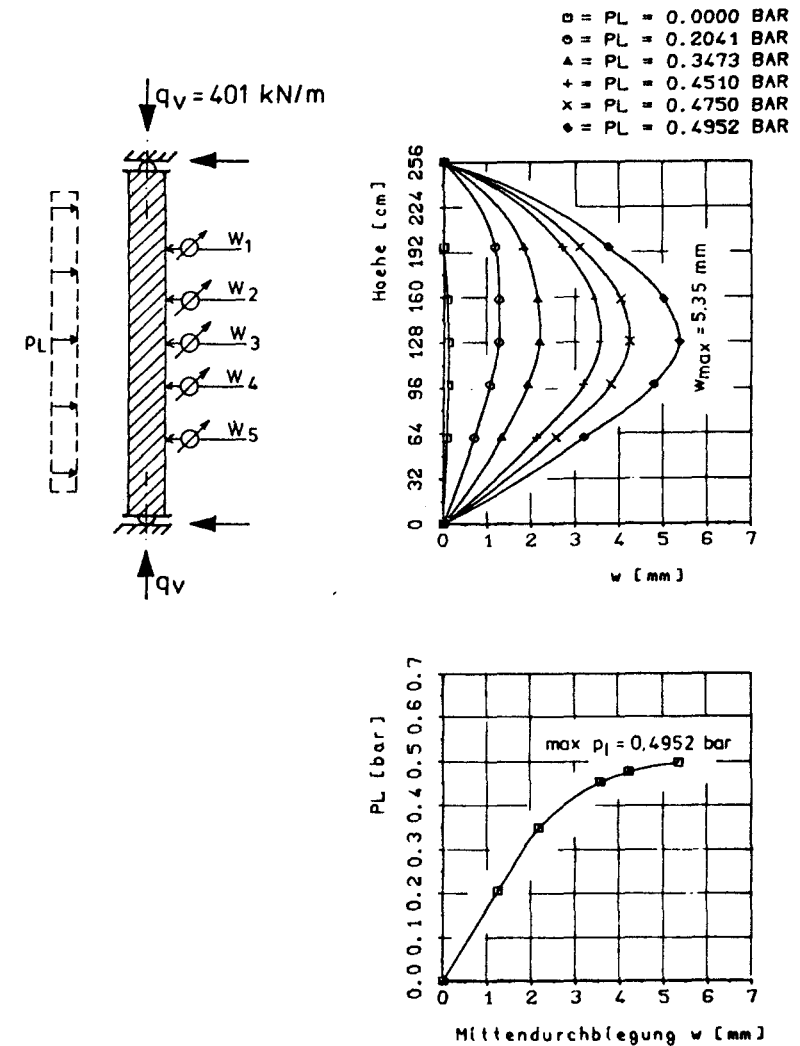


Bild 33: Durchbiegungen der Mauerwerkswand II/1

Anlage 21 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

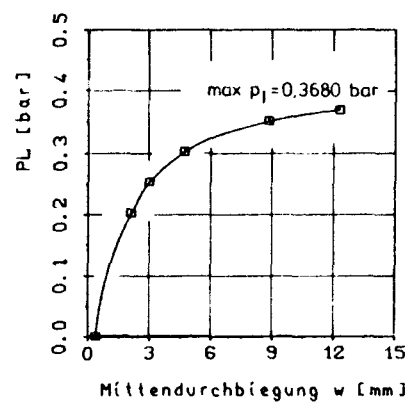
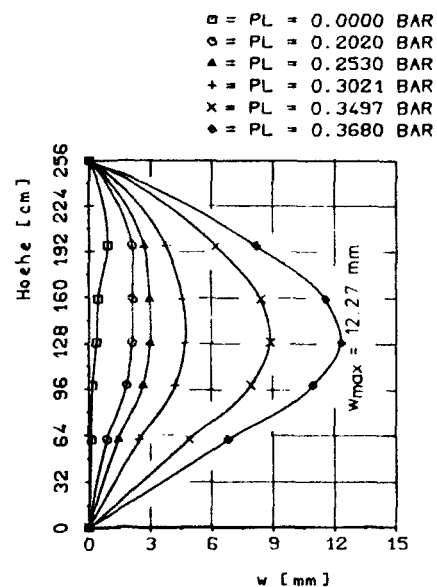
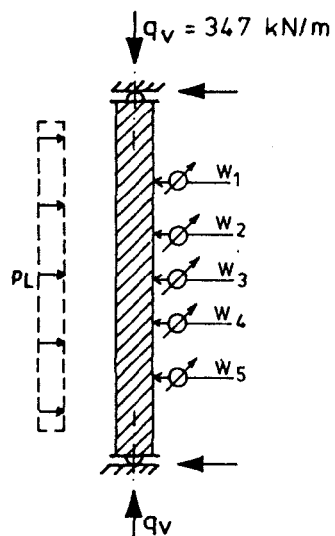


Bild 34: Durchbiegungen der Mauerwerkswand II/2

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 22 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

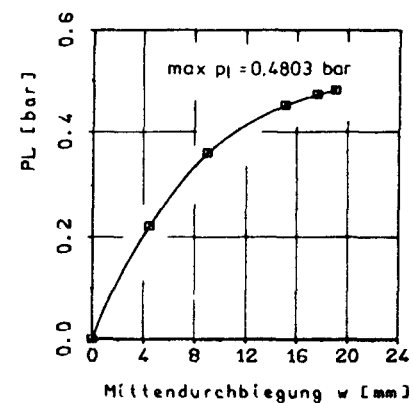
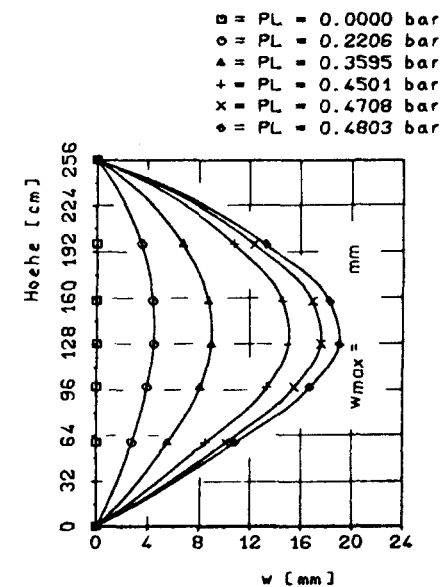
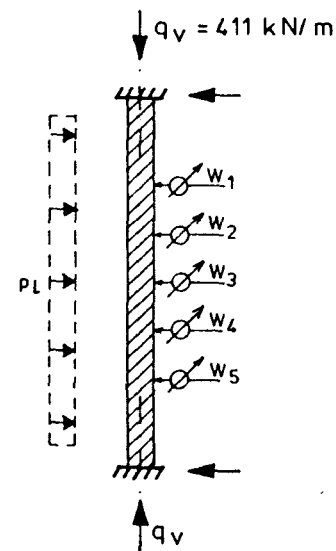


Bild 35: Durchbiegungen der Mauerwerkswand II/3

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 23 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

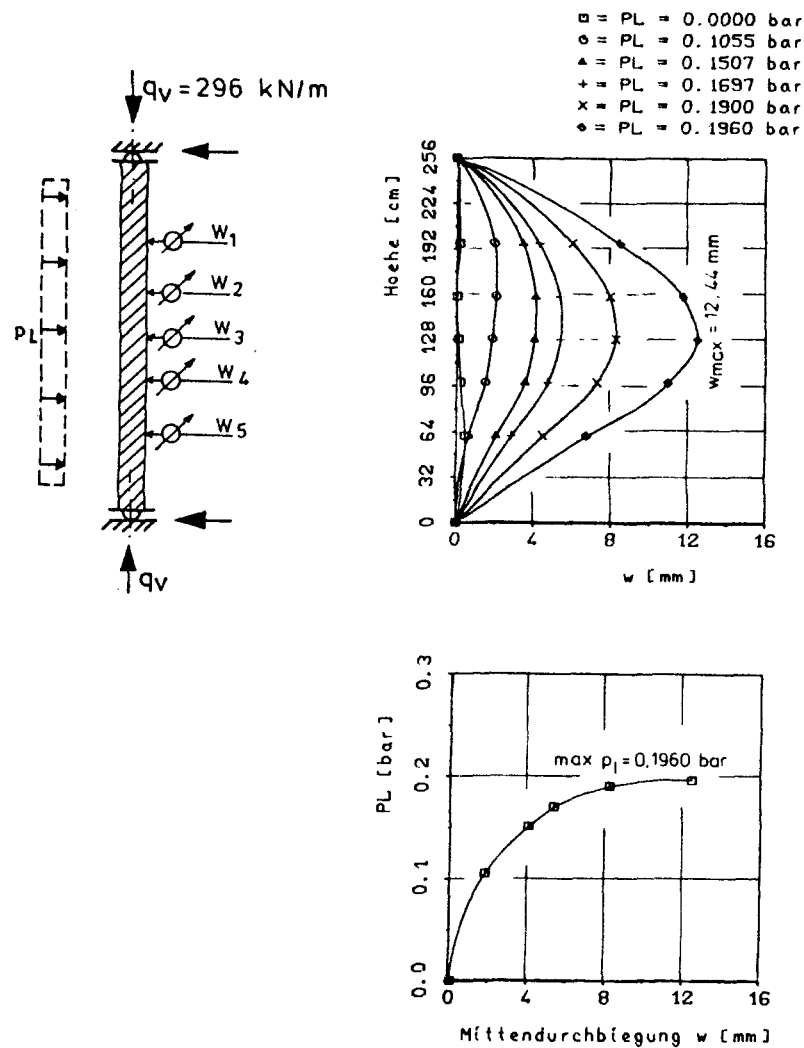


Bild 36: Durchbiegungen der Mauerwerkswand II/4

Anlage 24 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. 817 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

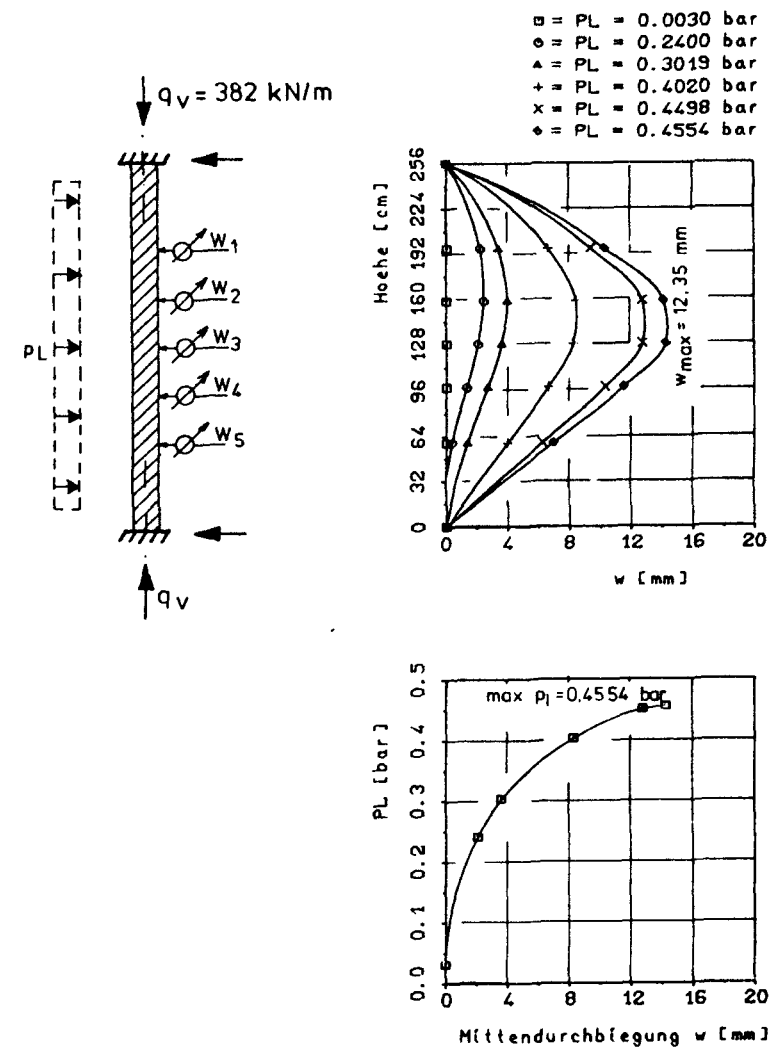


Bild 37: Durchbiegungen der Mauerwerkswand II/6

Anlage 25 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. 817 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

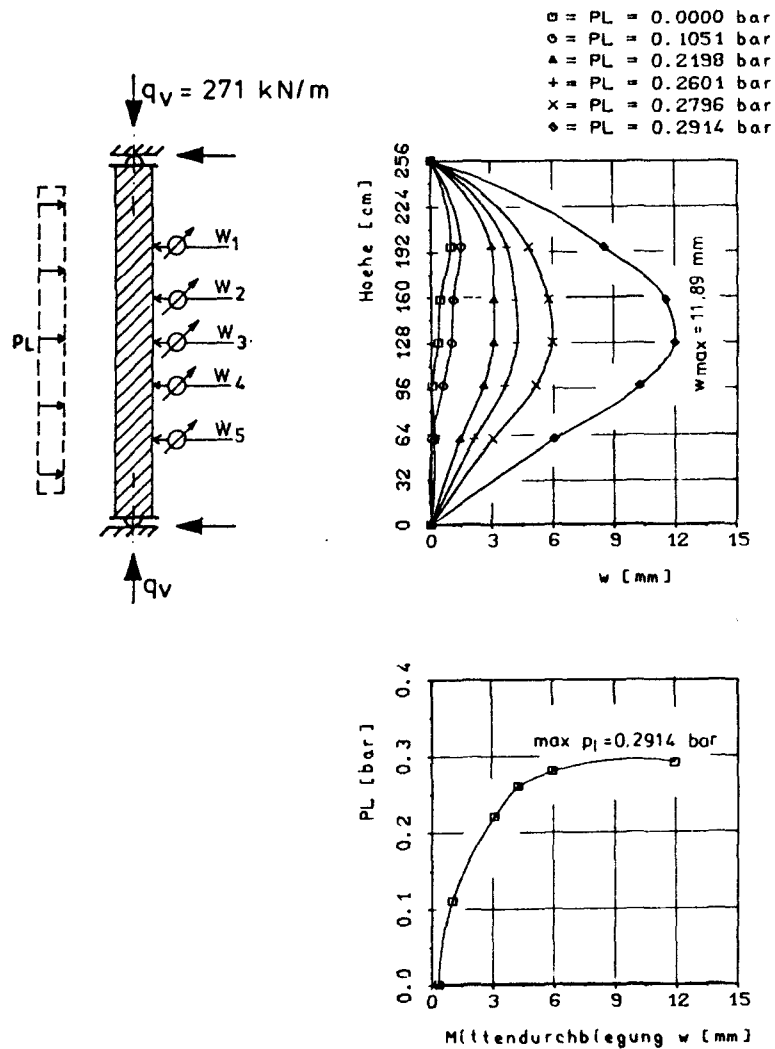


Bild 38: Durchbiegungen der Mauerwerkswand II/7

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 26 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

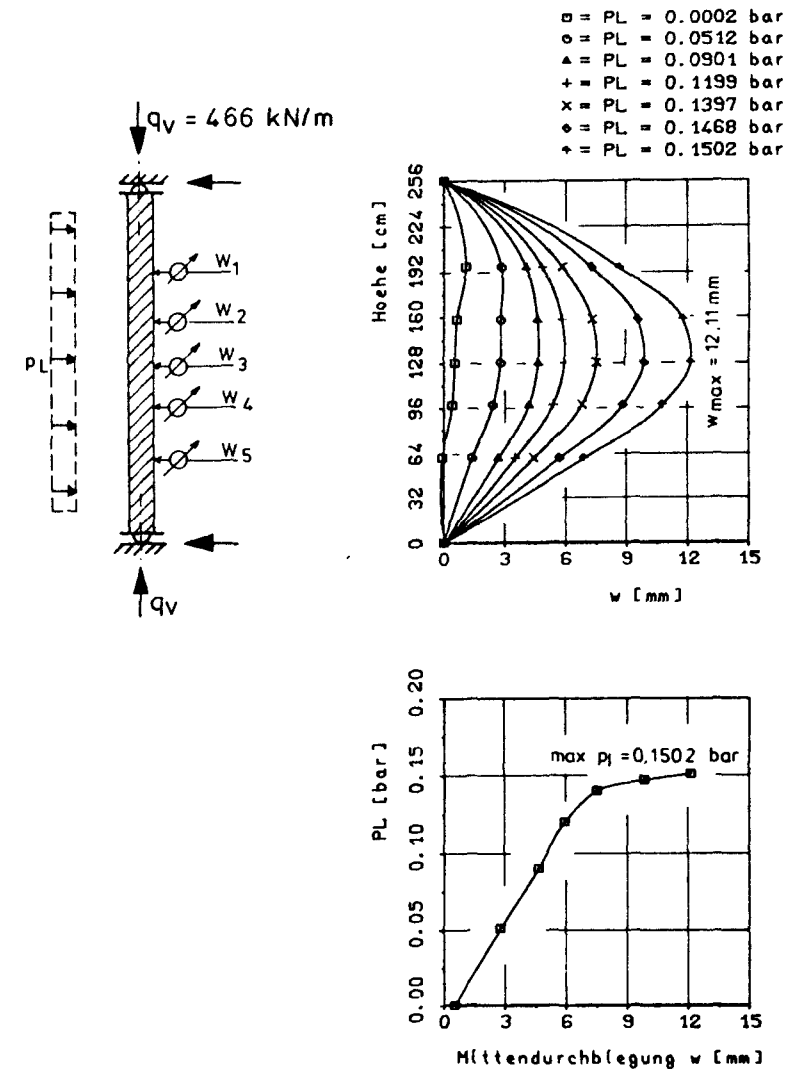
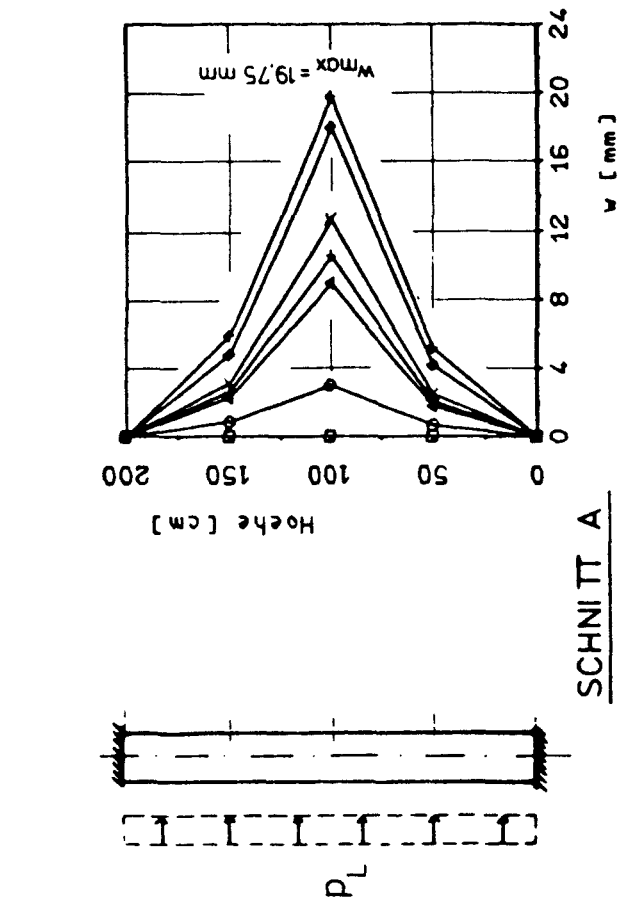


Bild 39: Durchbiegungen der Mauerwerkswand II/8

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 27 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6



$\square = P_L = 0.0000 \text{ BAR}$
 $\circ = P_L = 0.5001 \text{ BAR}$
 $\triangle = P_L = 1.0033 \text{ BAR}$
 $+$ $= P_L = 1.1037 \text{ BAR}$
 $\times = P_L = 1.2010 \text{ BAR}$
 $\diamond = P_L = 1.3006 \text{ BAR}$
 $\star = P_L = 1.3489 \text{ BAR}$

— EINGESpanNTER RAND
 - - - FREIER RAND

SCHNITT B

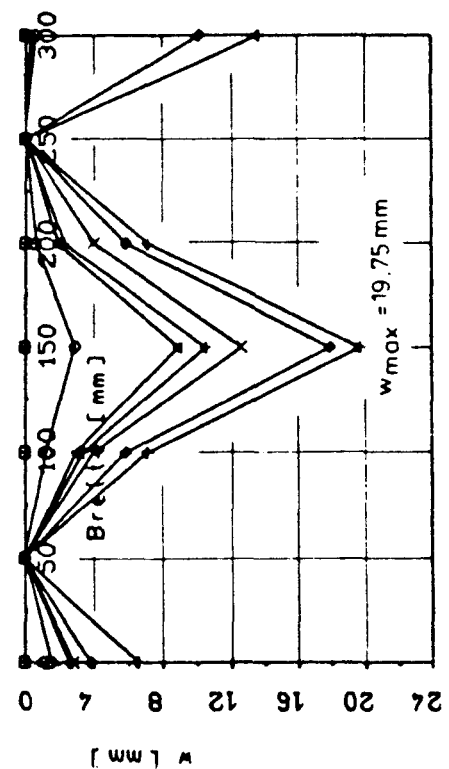


Bild 40: Durchbiegungen der Mauerwerkswand III/1

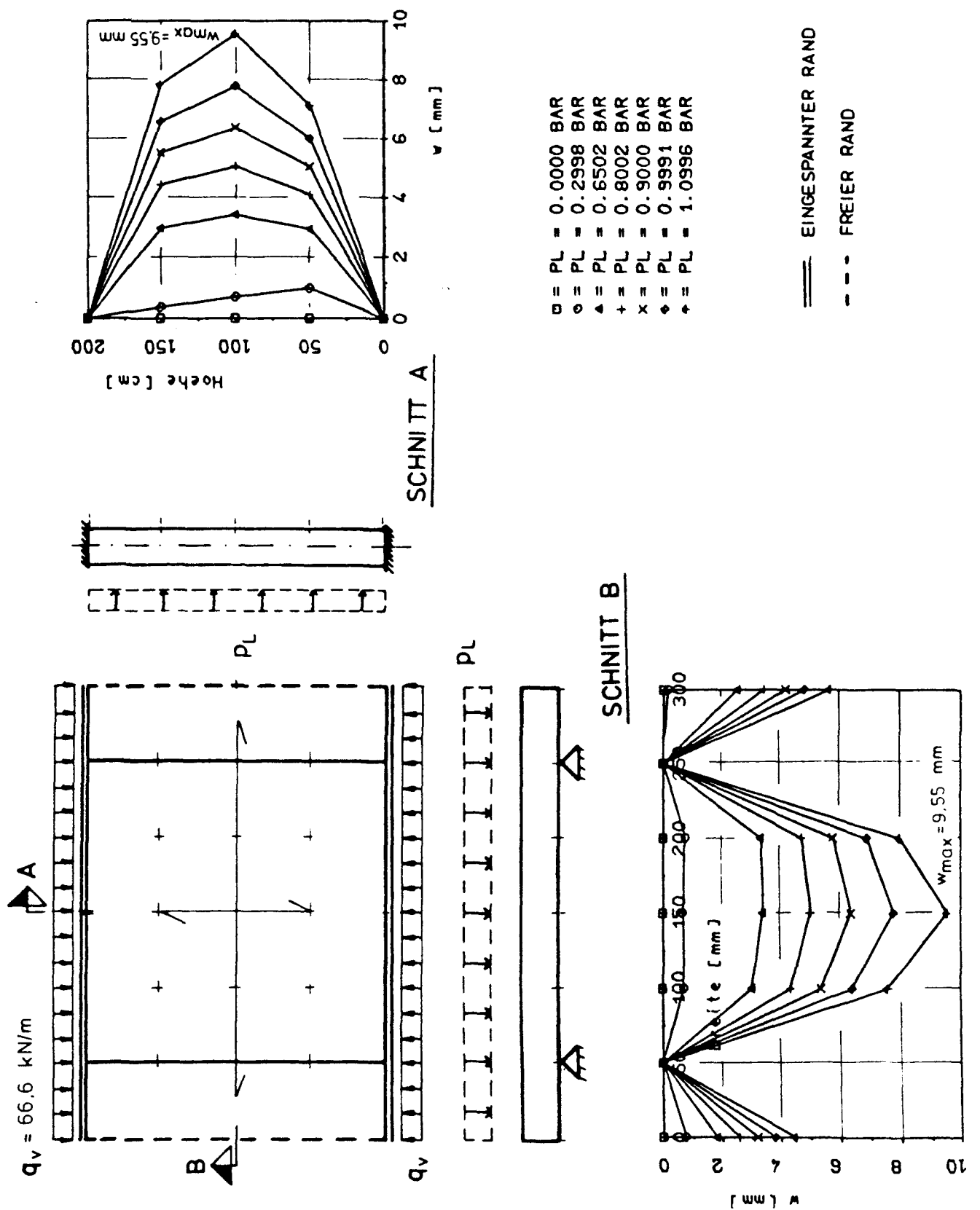
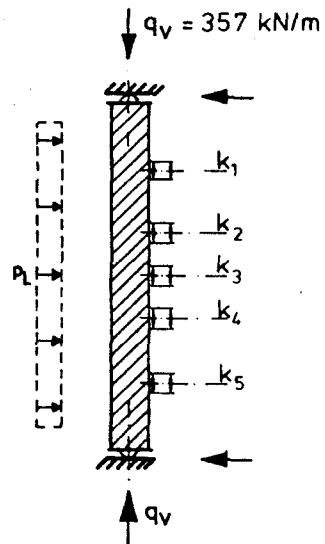


Bild 41: Durchbiegungen der Mauerwerkswand III/2



- = PL = 0.0500 BAR
- = PL = 0.2100 BAR
- △ = PL = 0.3200 BAR
- + = PL = 0.3800 BAR
- x = PL = 0.4000 BAR
- ◆ = PL = 0.4400 BAR

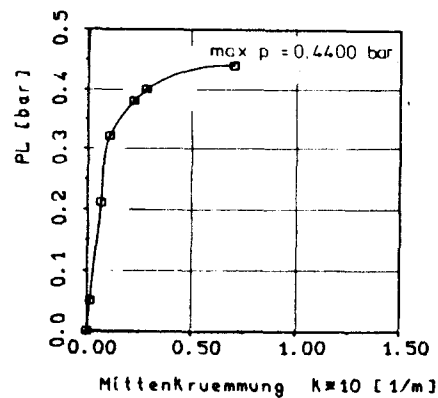
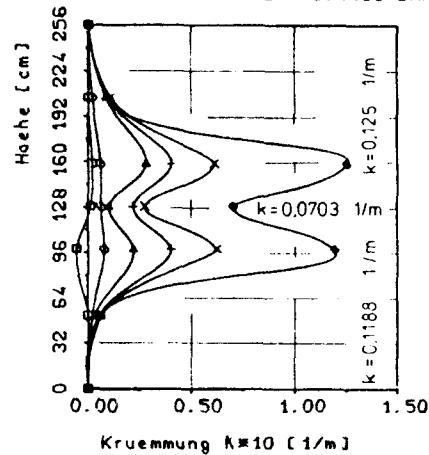
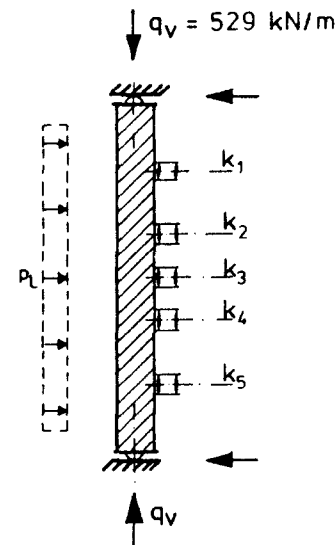


Bild 42: Krümmungsverlauf über die Höhe der Wand I/1

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 30 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6



- = PL = 0.0000 BAR
- = PL = 0.2069 BAR
- △ = PL = 0.4022 BAR
- + = PL = 0.5011 BAR
- x = PL = 0.5417 BAR
- ◆ = PL = 0.5810 BAR
- ⊕ = PL = 0.6051 BAR

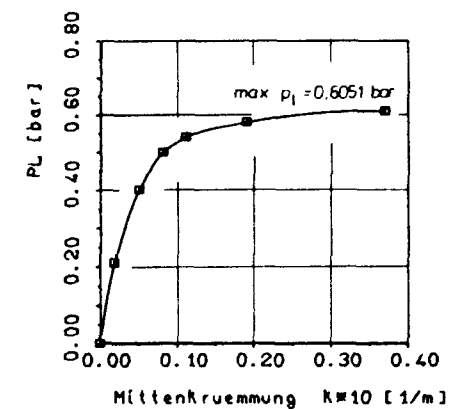
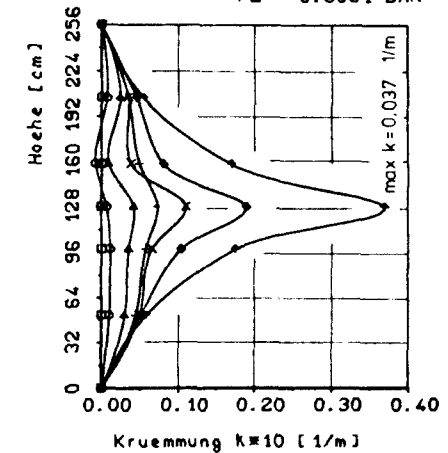
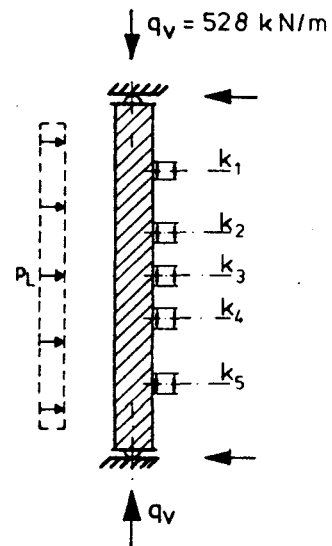


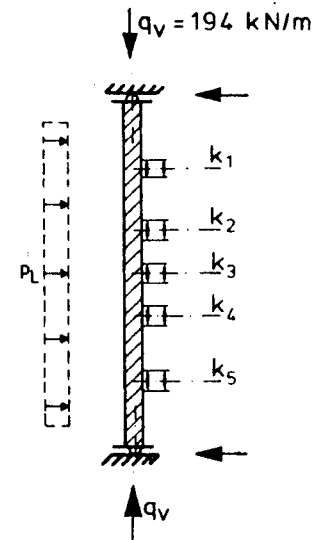
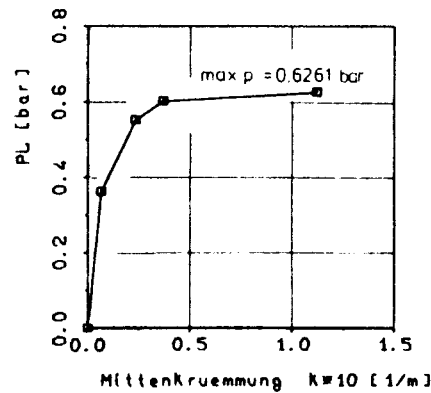
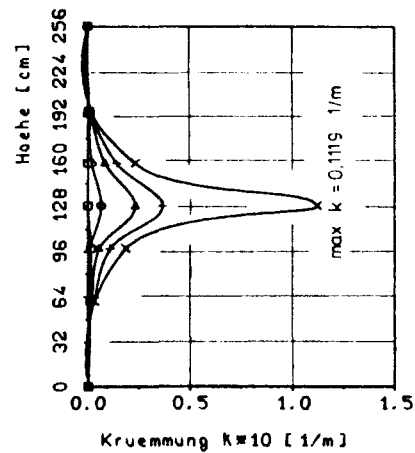
Bild 43: Krümmungsverlauf über die Höhe der Wand I/2

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 31 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6



- = PL = 0.0000 BAR
- = PL = 0.3620 BAR
- △ = PL = 0.5521 BAR
- + = PL = 0.6022 BAR
- x = PL = 0.6261 BAR



- = PL = 0.0000 BAR
- = PL = 0.0143 BAR
- △ = PL = 0.0226 BAR
- + = PL = 0.0429 BAR
- x = PL = 0.0536 BAR
- ◇ = PL = 0.0612 BAR
- ⋄ = PL = 0.0697 BAR
- x = PL = 0.0729 BAR

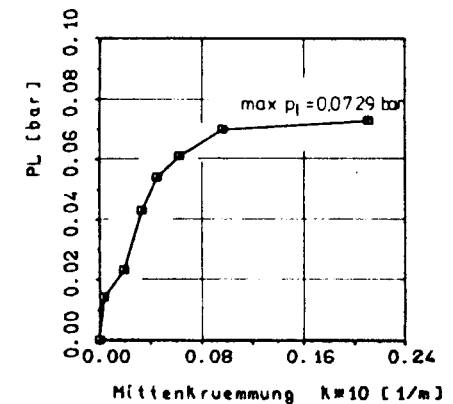
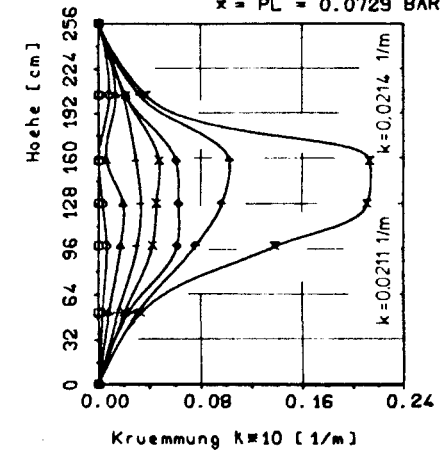


Bild 44: Krümmungsverlauf über die Höhe der Wand I/3

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 32 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

Bild 45: Krümmungsverlauf über die Höhe der Wand I/4

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 33 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

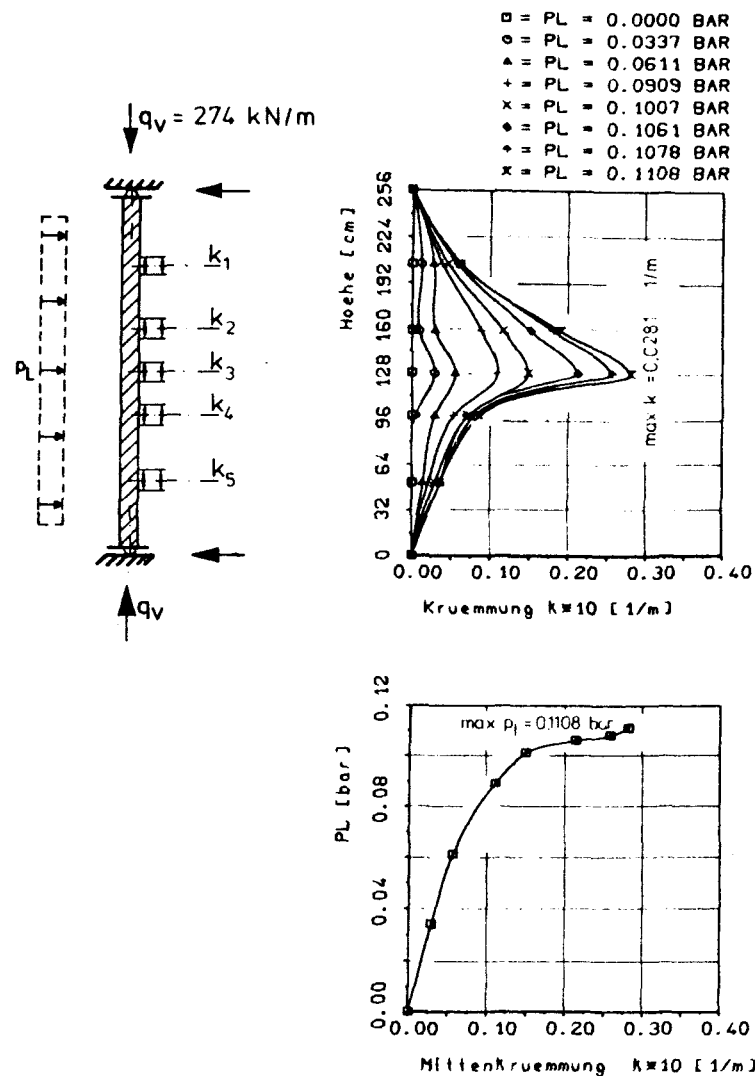


Bild 46: Krümmungsverlauf über die Höhe der Wand I/5

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 34 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

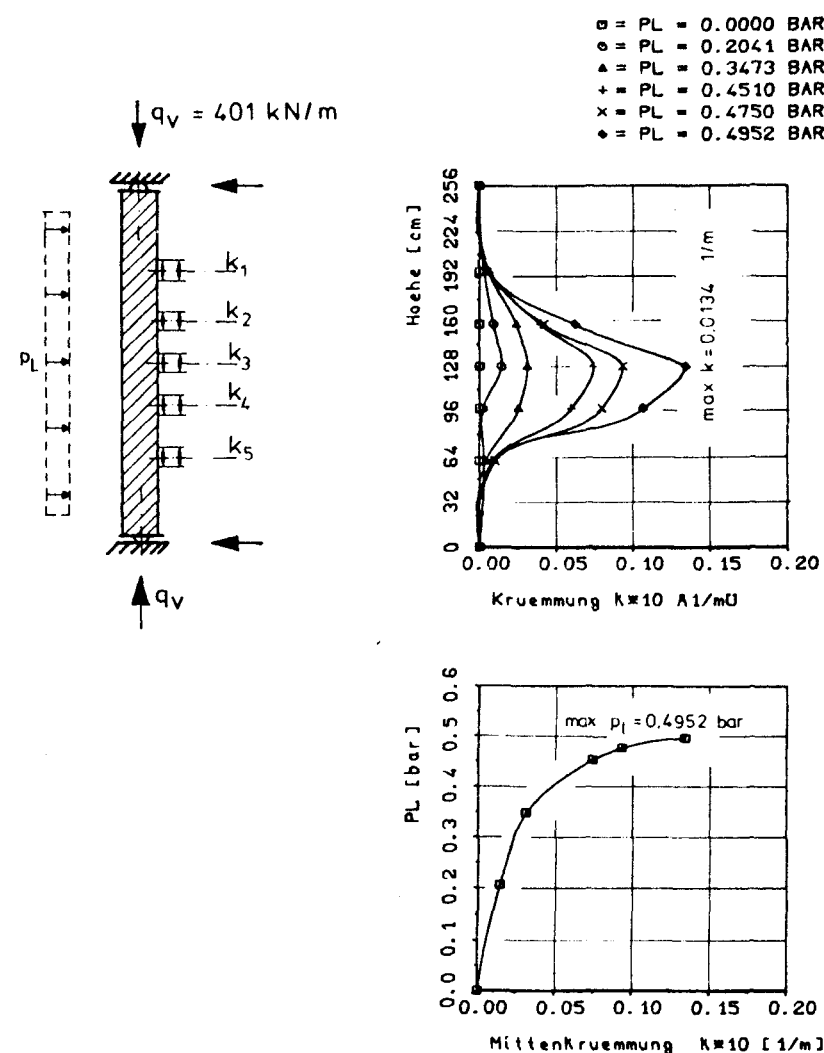


Bild 47: Krümmungsverlauf über die Höhe der Wand II/1

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 35 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

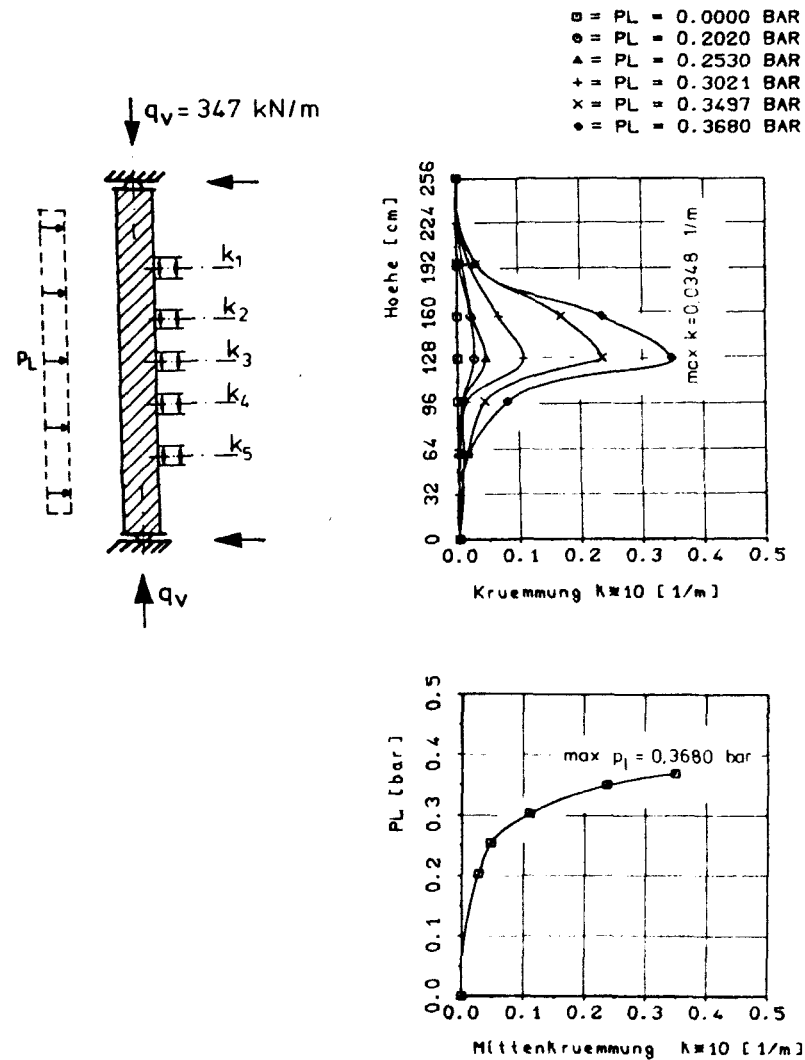


Bild 48: Krümmungsverlauf über die Höhe der Wand II/2

Anlage 36 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

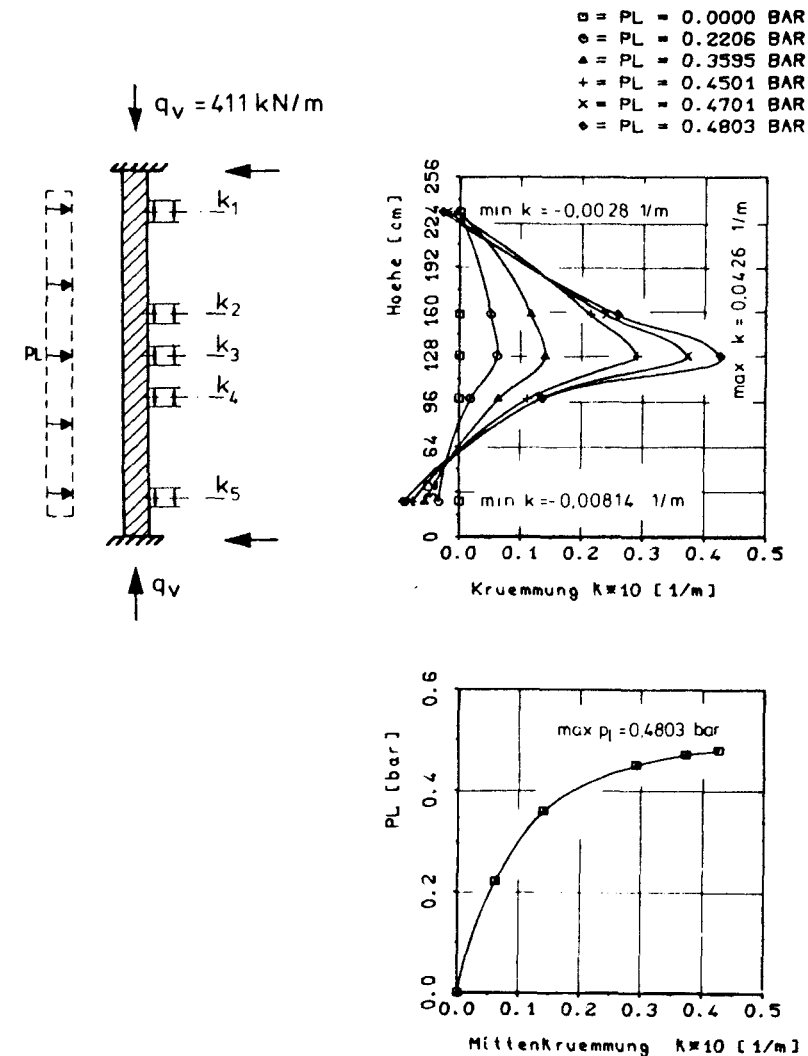


Bild 49: Krümmungsverlauf über die Höhe der Wand II/3

Anlage 37 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

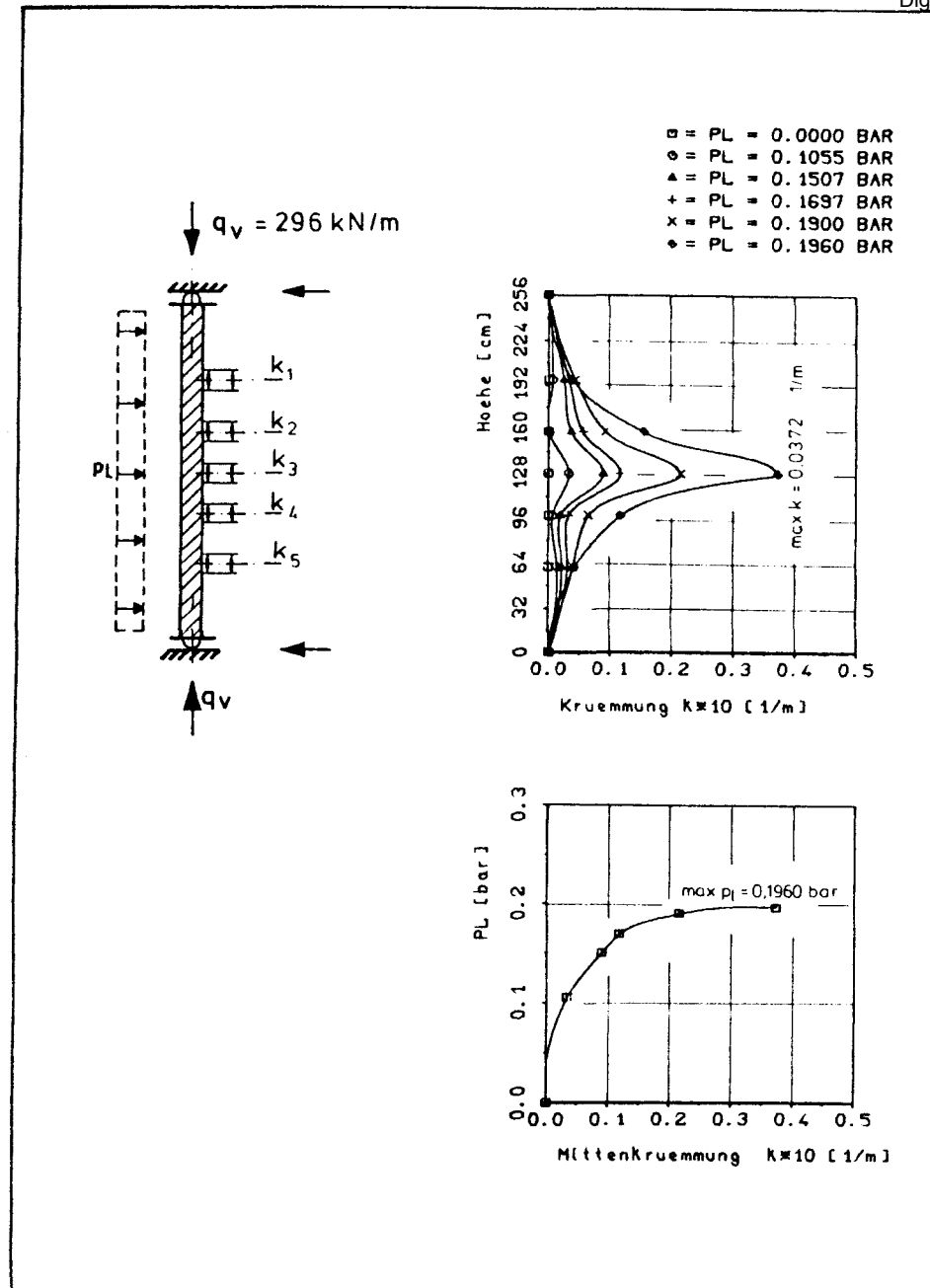


Bild 50: Krümmungsverlauf über die Höhe der Wand II/4

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 38 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

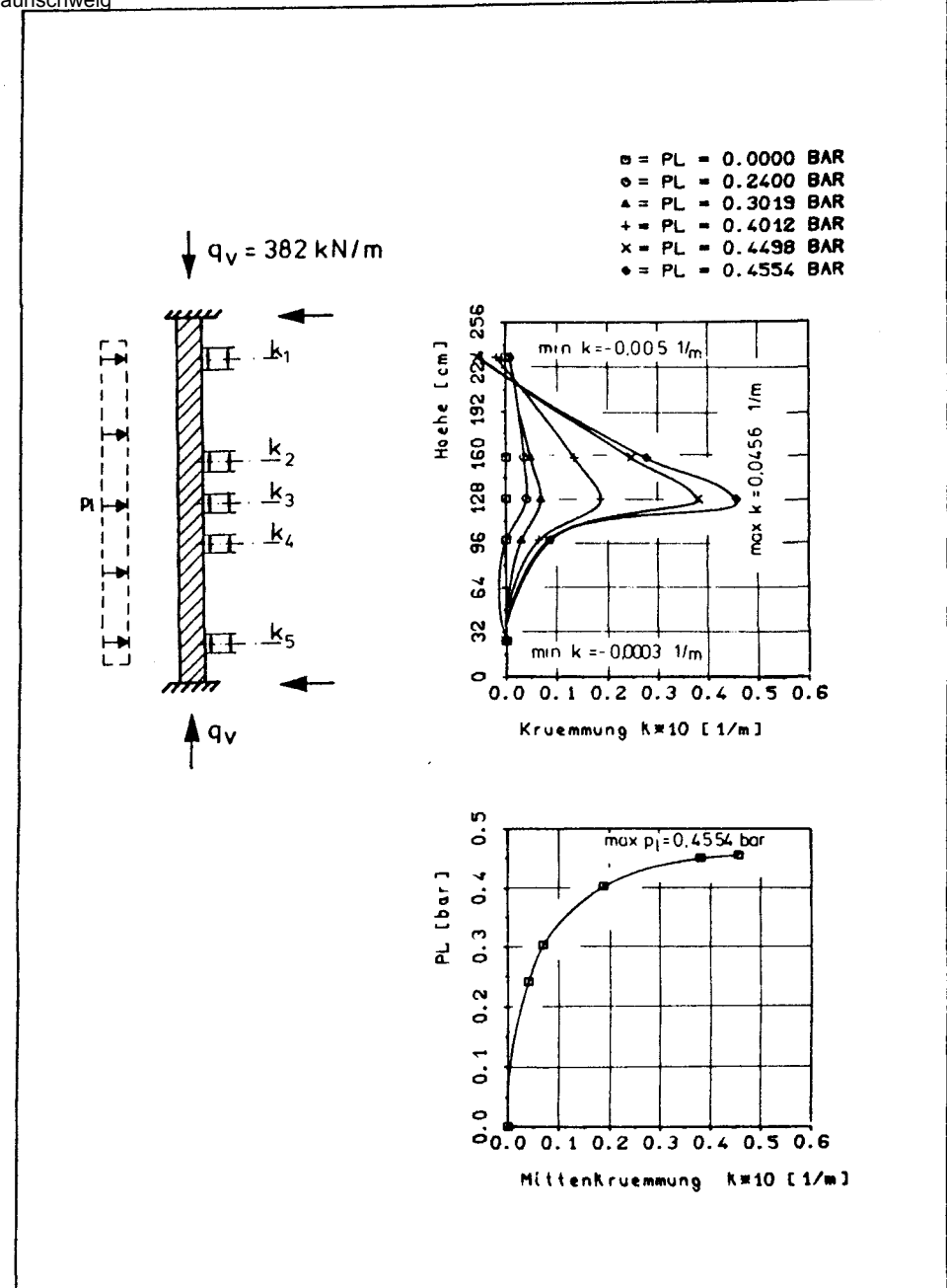


Bild 51: Krümmungsverlauf über die Höhe der Wand II/6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 39 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

- = PL = 0.00 BAR
 ○ = PL = 0.1051 BAR
 △ = PL = 0.2198 BAR
 + = PL = 0.2601 BAR
 × = PL = 0.2796 BAR
 ◆ = PL = 0.2914 BAR

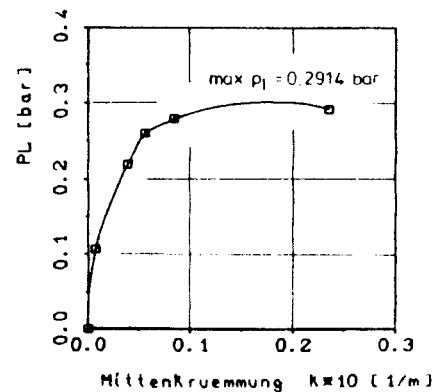
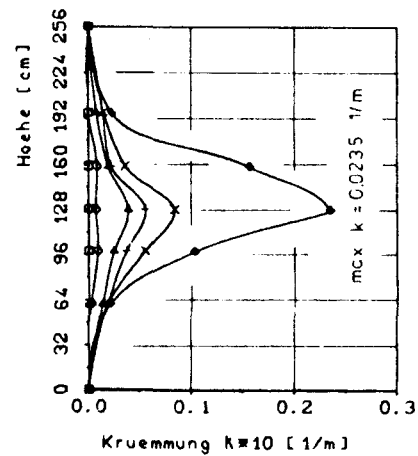
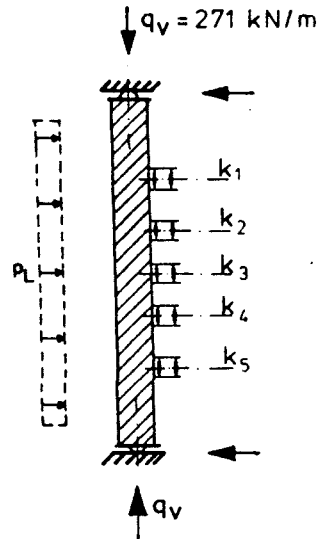


Bild 52: Krümmungsverlauf über die Höhe der Wand II/7

Anlage 40 zum
 Untersuchungs-
 bericht
 Nr. 817 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
 der Technischen Universität Braunschweig

- = PL = 0.0000 BAR
 ○ = PL = 0.0512 BAR
 △ = PL = 0.0901 BAR
 + = PL = 0.1199 BAR
 × = PL = 0.1397 BAR
 ◆ = PL = 0.1468 BAR
 ◆ = PL = 0.1502 BAR

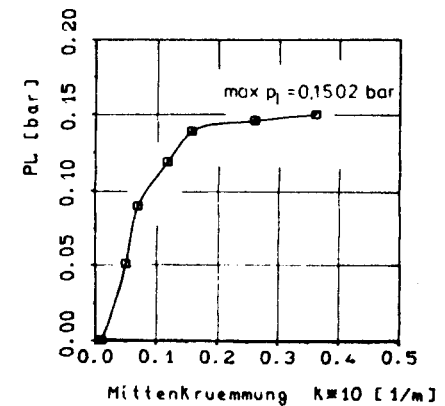
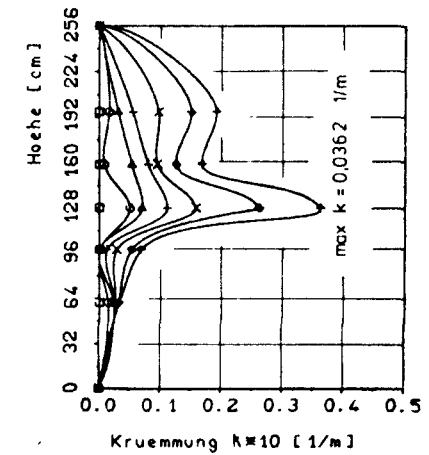
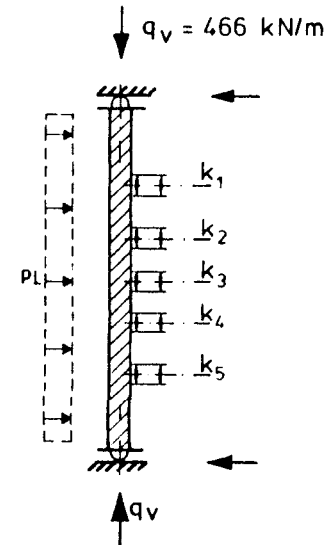
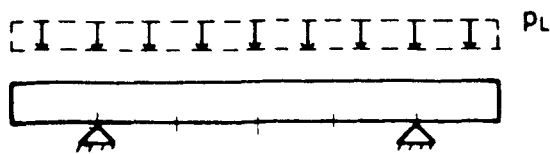
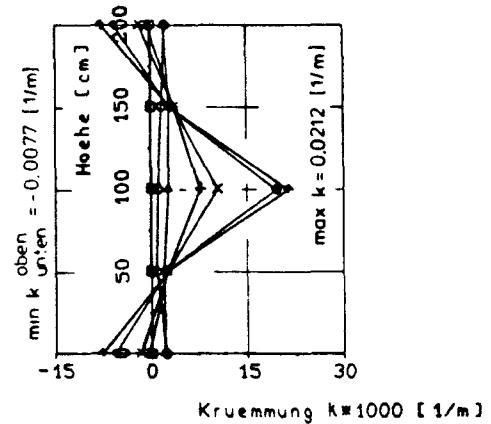
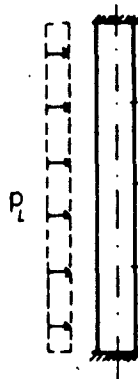
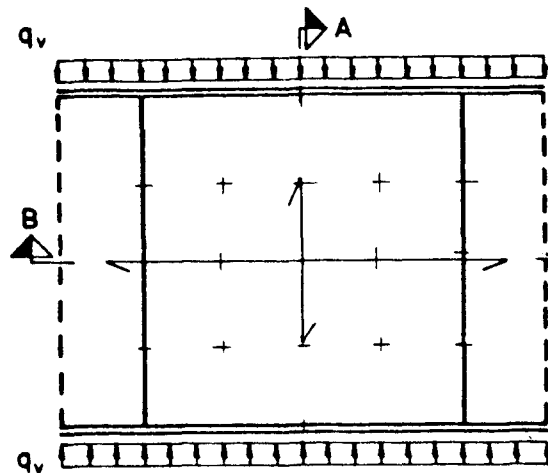
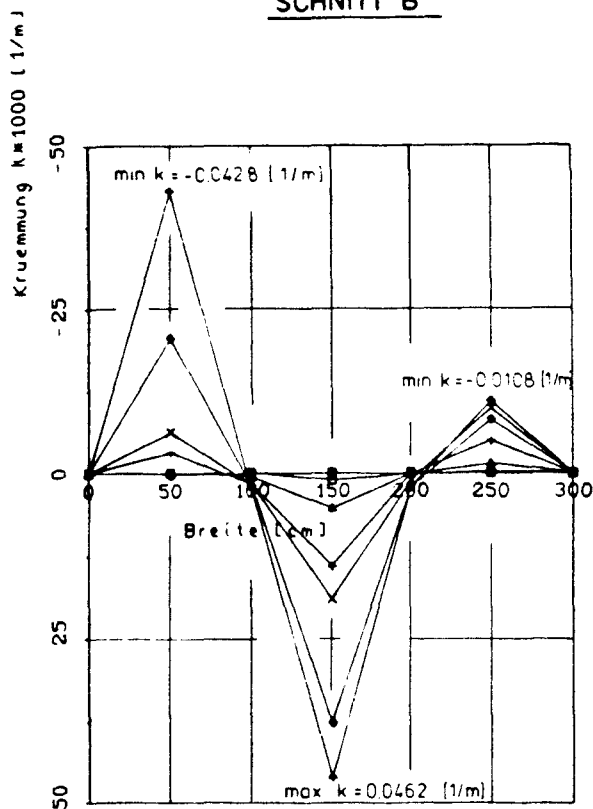


Bild 53: Krümmungsverlauf über die Höhe der Wand II/8

Anlage 41 zum
 Untersuchungs-
 bericht
 Nr. 817 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
 der Technischen Universität Braunschweig

SCHNITT B

- = P_L = 0.0000 BAR
- = P_L = 0.5001 BAR
- △ = P_L = 0.8019 BAR
- + = P_L = 1.1037 BAR
- x = P_L = 1.2010 BAR
- ◆ = P_L = 1.3006 BAR
- ◇ = P_L = 1.3489 BAR

== EINGESPANNTER RAND
 --- FREIER RAND

Bild 54: Krümmungsverläufe der Mauerwerkswand III/1

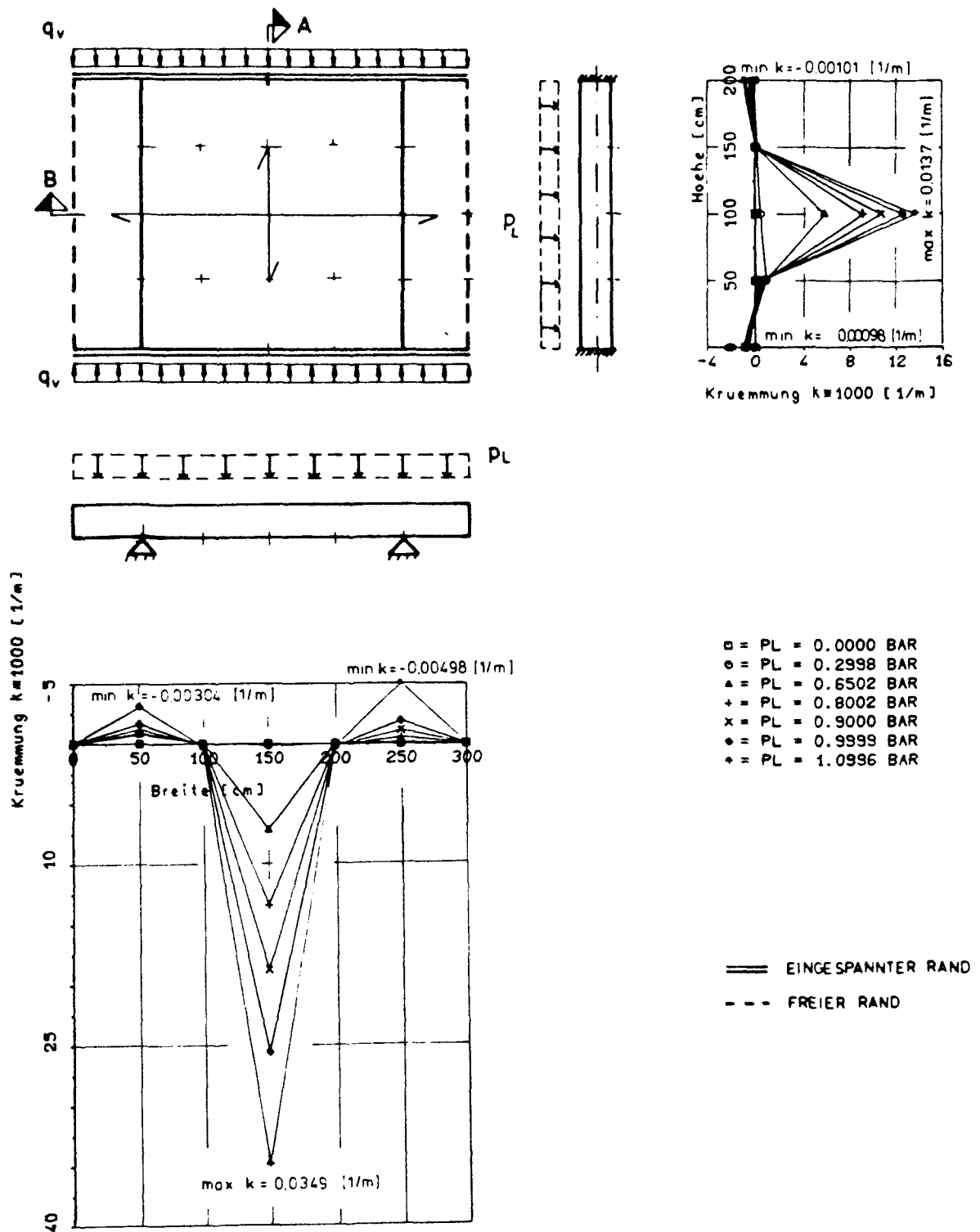


Bild 55: Krümmungsverläufe der Mauerwerkswand III/2

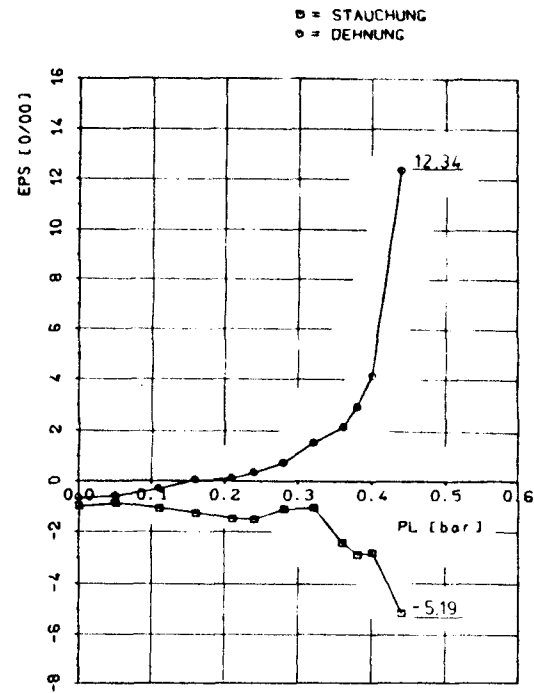
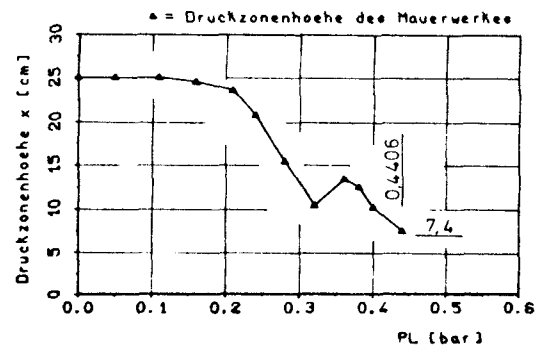
Dehnungen und Stauchungen:Größe der Druckzone:

Bild 56: Querschnittskenngrößen im Bereich der Meßstellen 45/48 der Mauerwerkswand I/1

Anlage 44 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

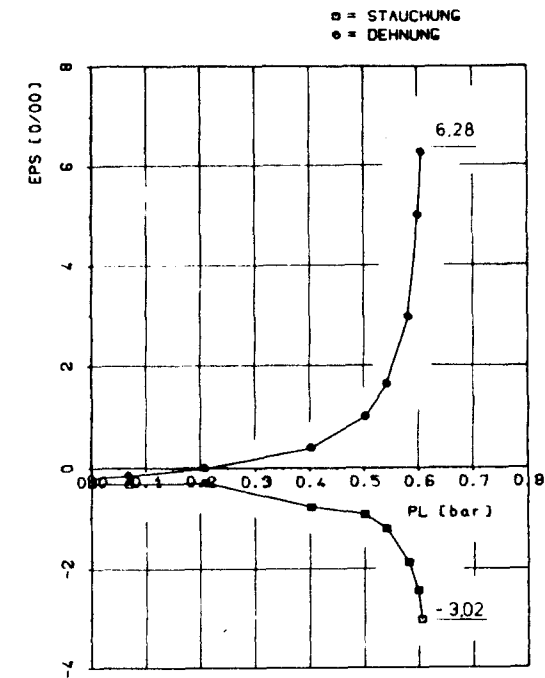
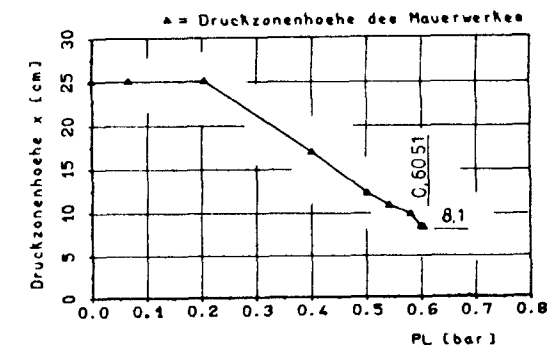
Dehnungen und Stauchungen:Größe der Druckzone:

Bild 57: Querschnittskenngrößen im Bereich der Meßstellen 45/48 der Mauerwerkswand I/2

Anlage 45 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

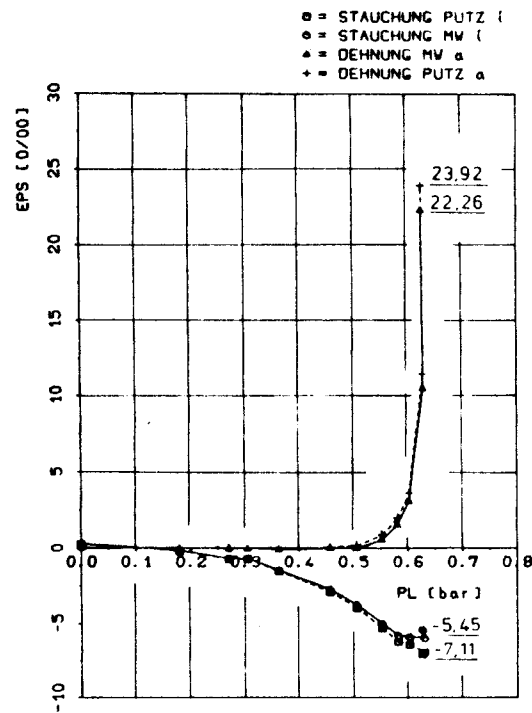
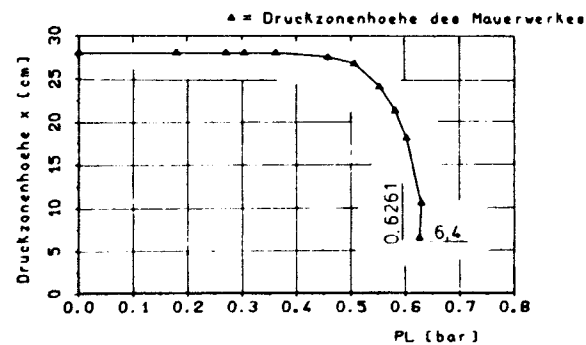
Dehnungen und Stauchungen:Größe der Druckzone:

Bild 58: Querschnittskenngrößen im Bereich der Meßstellen 44/47 der Mauerwerkswand I/3

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 46 zum
Untersuchungs-
bericht

Nr. B17 810787-6

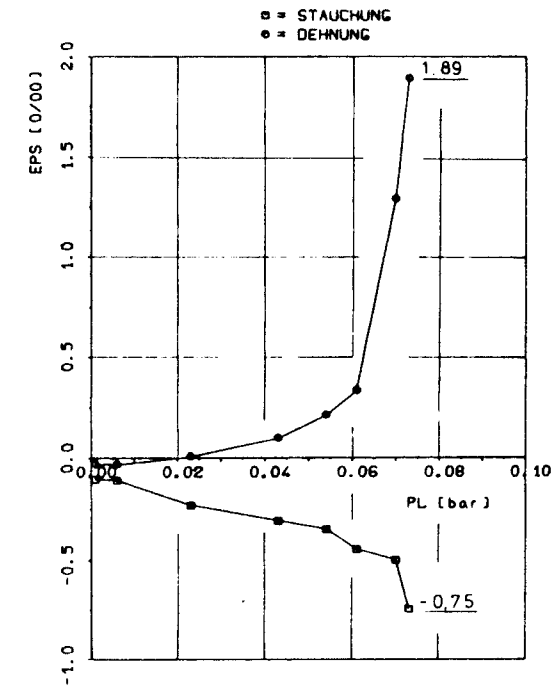
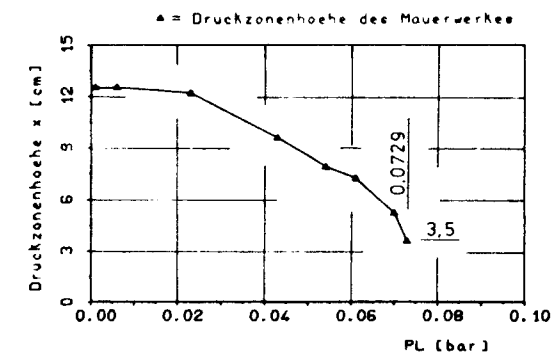
Dehnungen und Stauchungen:Größe der Druckzone:

Bild 59: Querschnittskenngrößen im Bereich der Meßstellen 45/48 der Mauerwerkswand I/4

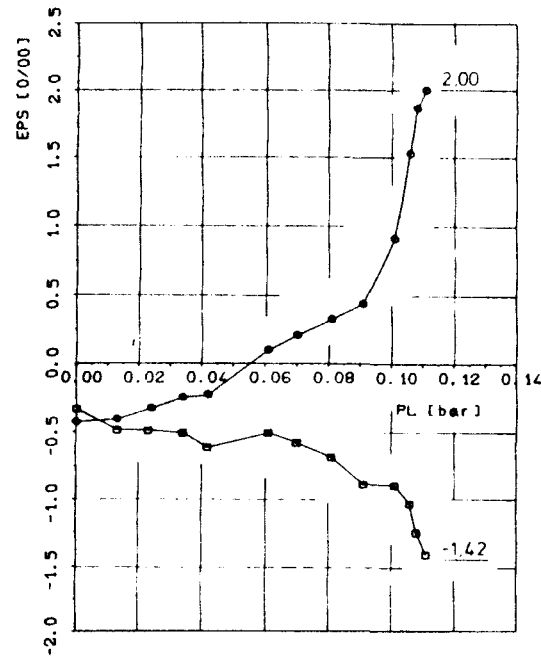
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 47 zum
Untersuchungs-
bericht

Nr. B17 810787-6

Dehnungen und Stauchungen:

□ = STAUCHUNG
○ = DEHNUNG

Größe der Druckzone:

▲ = Druckzonenhöhe des Mauerwerkes

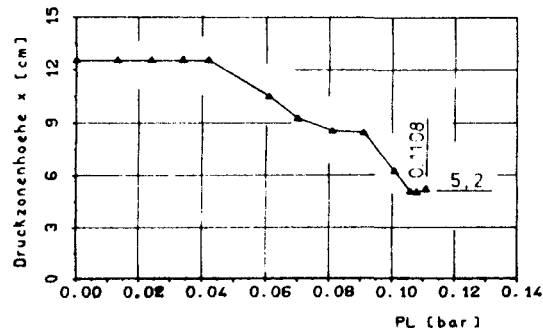


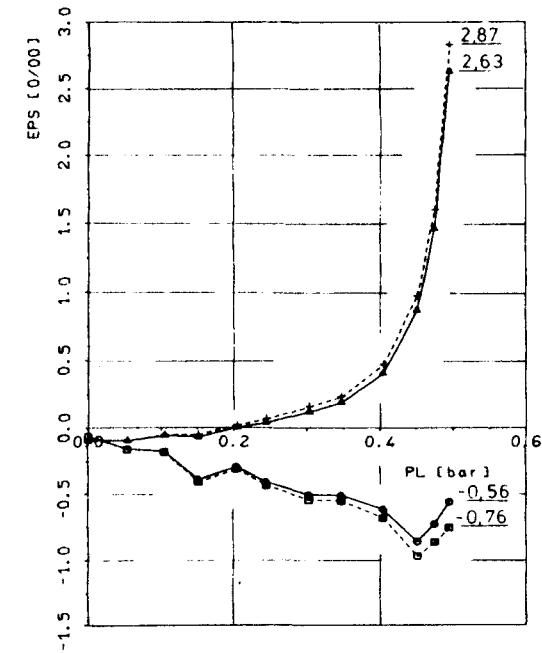
Bild 60: Querschnittskenngrößen im Bereich der Meßstellen 45/48 der Mauerwerkswand I/5

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 48 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

Dehnungen und Stauchungen:

□ = STAUCHUNG PUTZ I
○ = STAUCHUNG MW I
▲ = DEHNUNG MW a
+ = DEHNUNG PUTZ a

Größe der Druckzone:

▲ = Druckzonenhöhe des Mauerwerkes

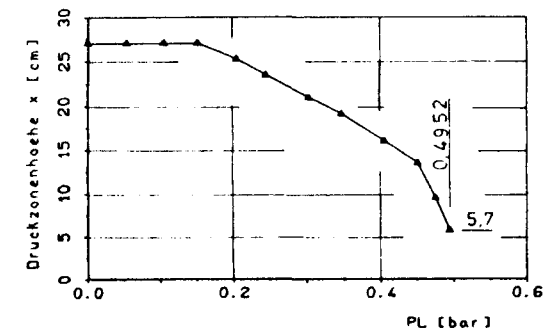


Bild 61: Querschnittskenngrößen im Bereich der Meßstellen 44/47 der Mauerwerkswand II/1

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 49 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

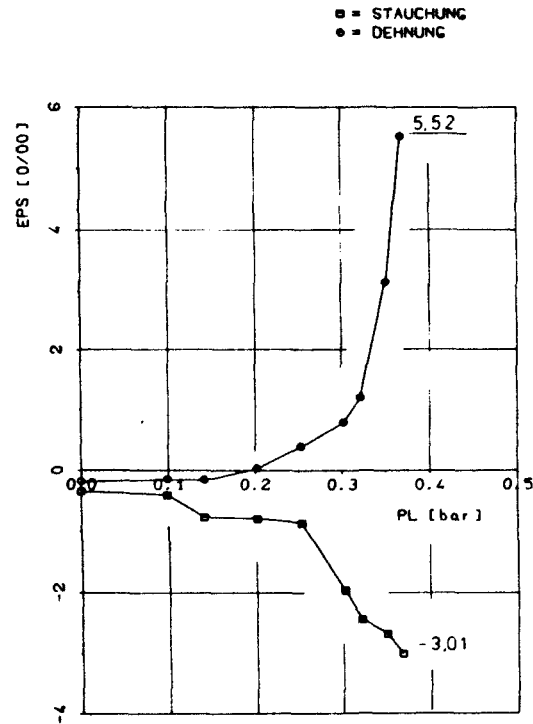
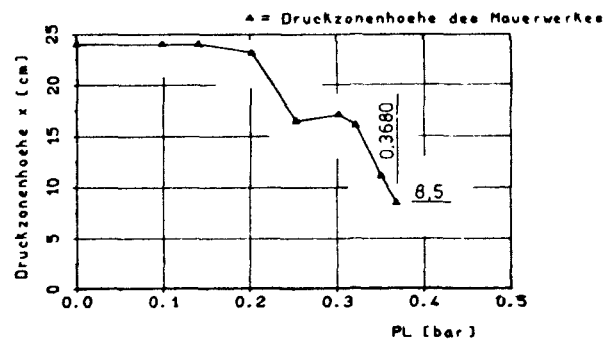
Dehnungen und Stauchungen:Größe der Druckzone:

Bild 62: Querschnittskenngrößen im Bereich der Meßstellen 44/47 der Mauerwerkswand II/2

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 50 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

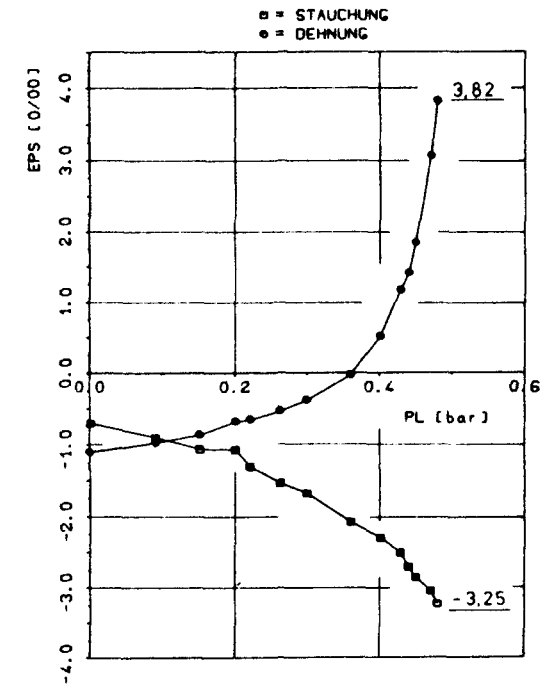
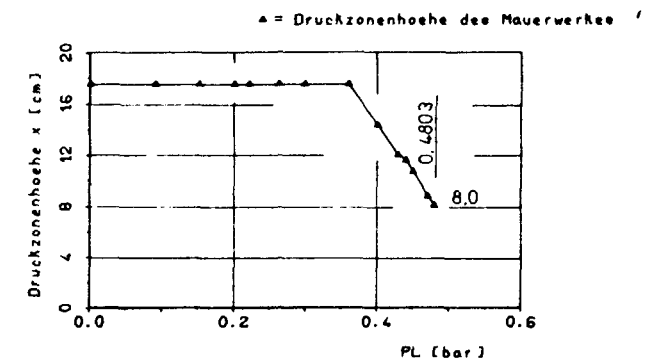
Dehnungen und Stauchungen:Größe der Druckzone:

Bild 63: Querschnittskenngrößen im Bereich der Meßstellen 44/47 der Mauerwerkswand II/3

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 51 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

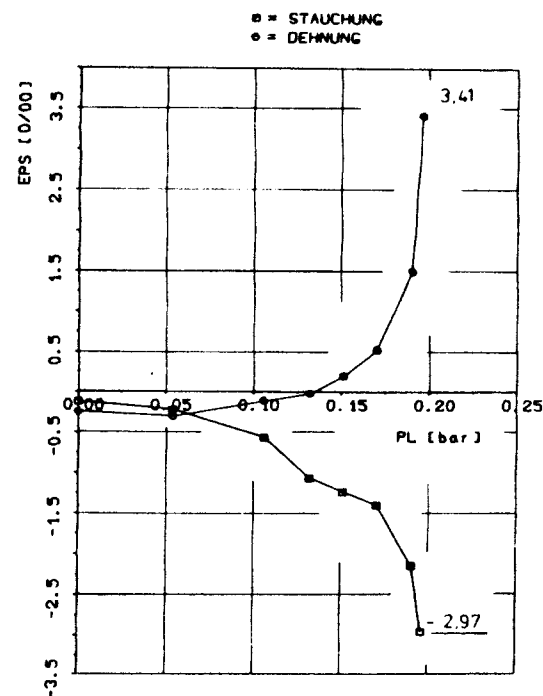
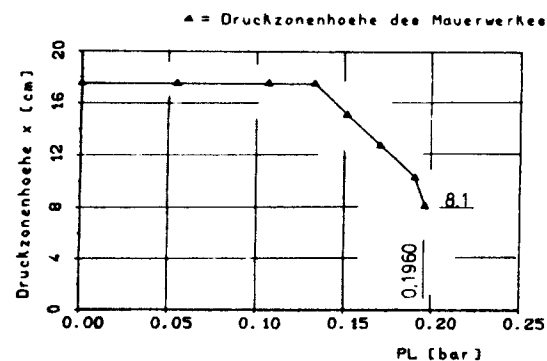
Dehnungen und Stauchungen:Größe der Druckzone:

Bild 64: Querschnittskenngößen im Bereich der Meßstellen 44/47 der Mauerwerkswand II/4

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 52 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

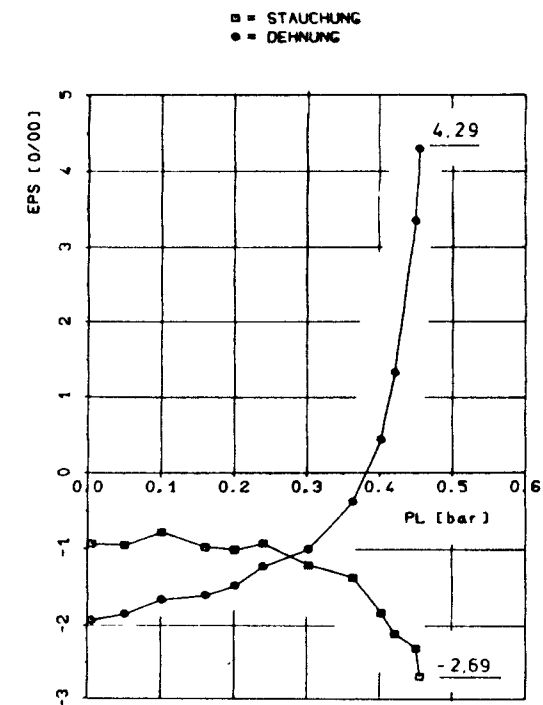
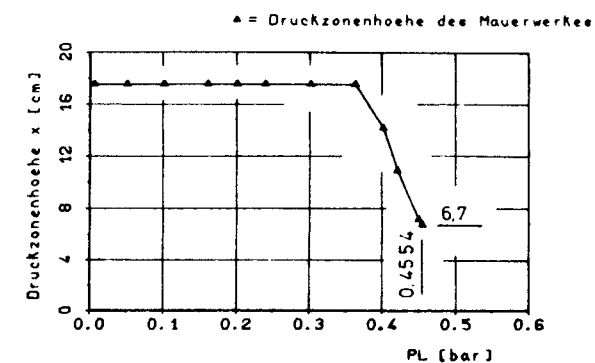
Dehnungen und Stauchungen:Größe der Druckzone:

Bild 65: Querschnittskenngößen im Bereich der Meßstellen 44/47 der Mauerwerkswand II/6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 53 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

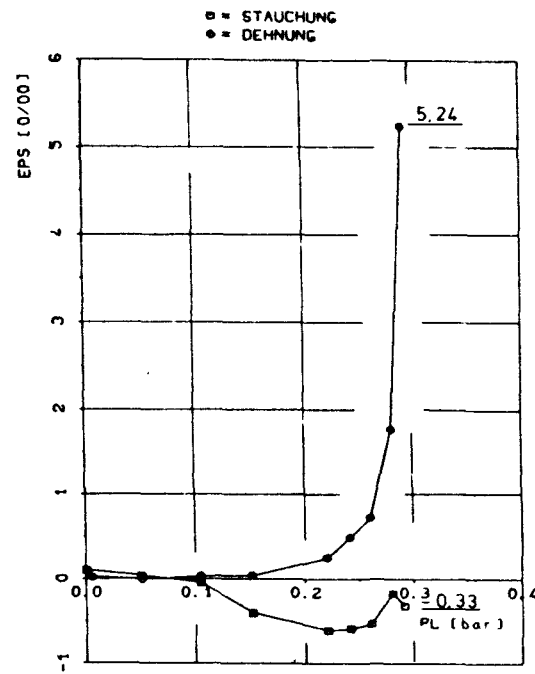
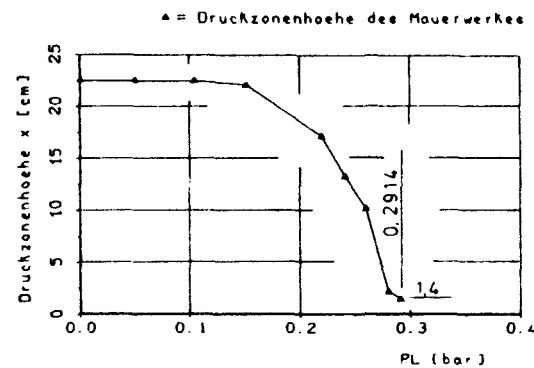
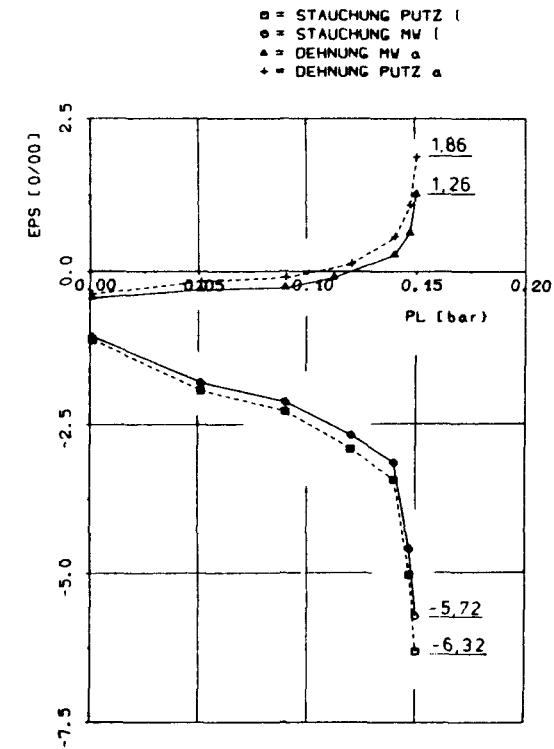
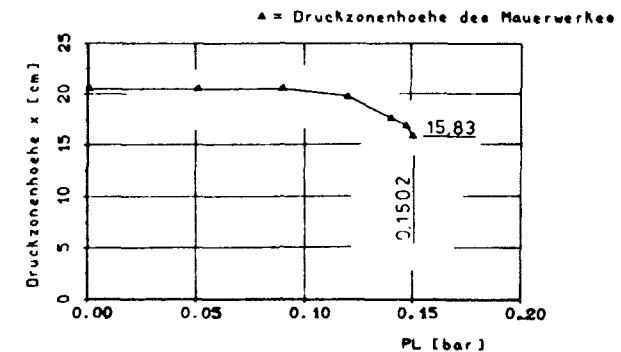
Dehnungen und Stauchungen:Größe der Druckzone:Dehnungen und Stauchungen:Größe der Druckzone:

Bild 66: Querschnittskenngößen im Bereich der Meßstellen 44/47 der Mauerwerkswand II/7

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 54 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

Bild 67: Querschnittskenngößen im Bereich der Meßstellen 44/47 der Mauerwerkswand II/8

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 55 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

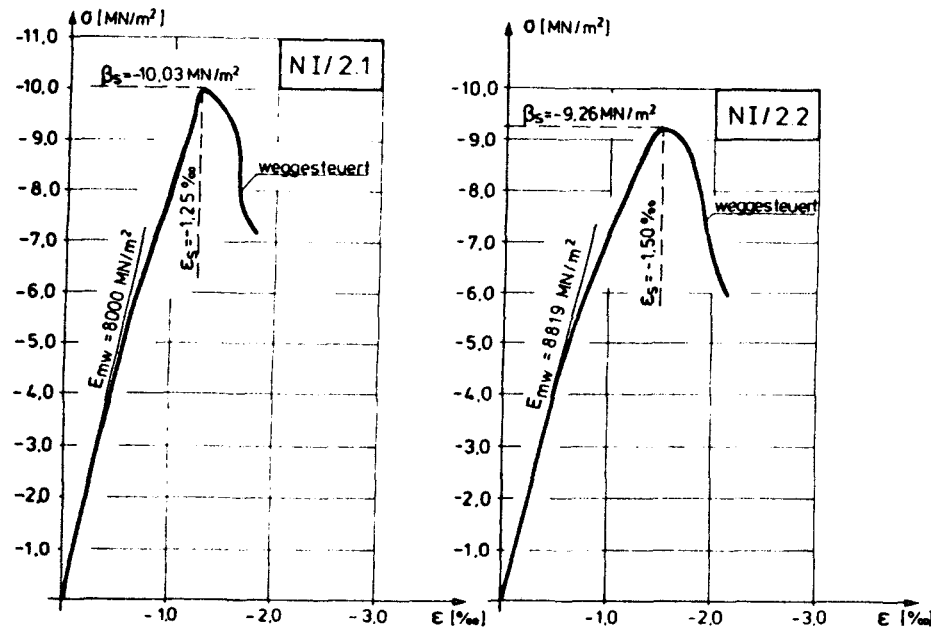
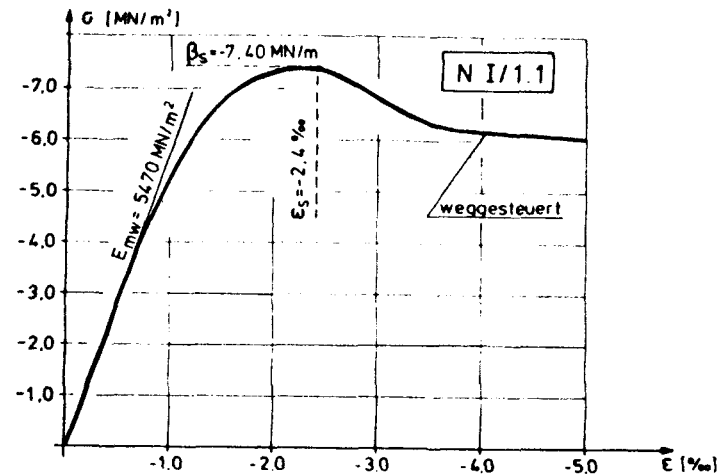


Bild 68: Spannungs-Dehnungs-Linien zentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Anlage 56 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B 17 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

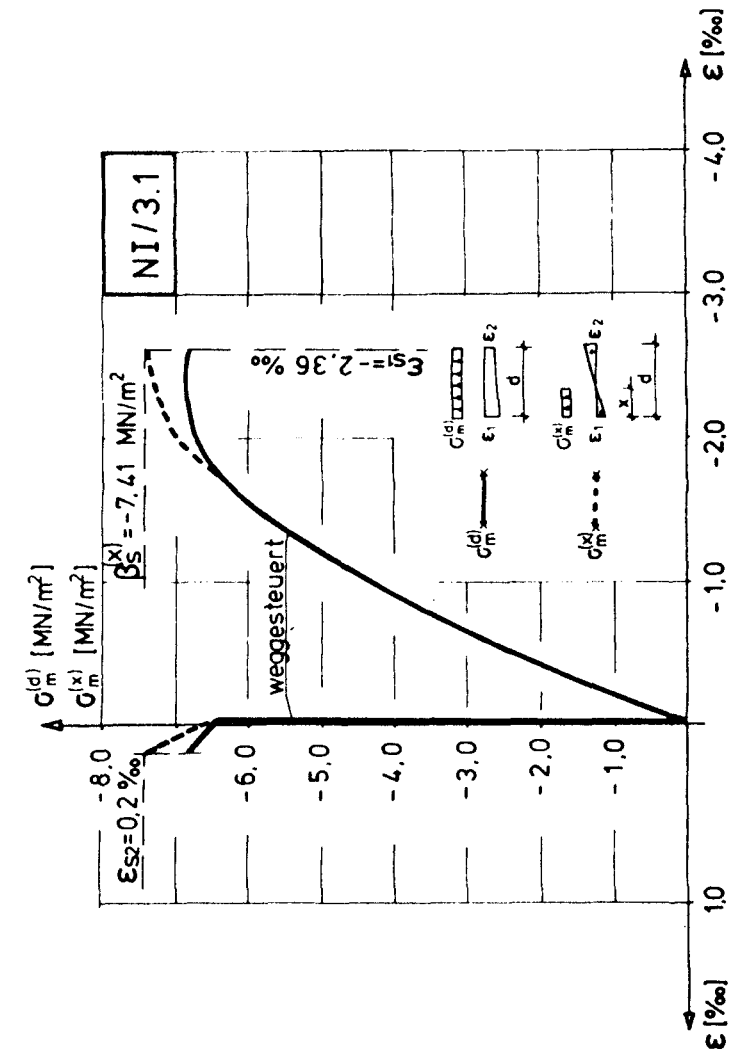


Bild 69: Spannungs-Dehnungs-Linie eines exzentrisch geprüften Norm-Prüfkörpers

Anlage 57 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B 17 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

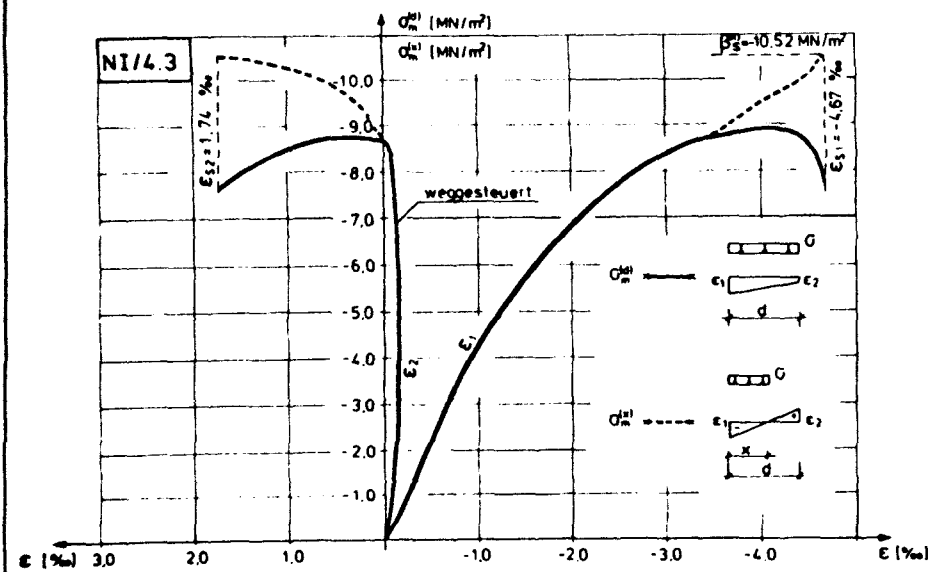
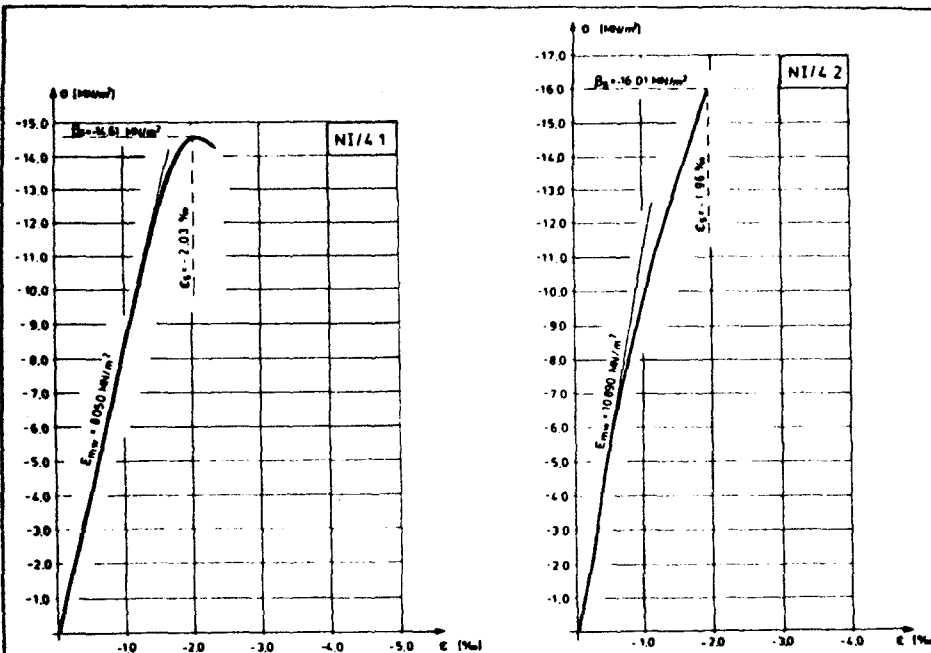


Bild 70: Spannungs-Dehnungs-Linien zentrisch oder exzentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Anlage 58 zum Untersuchungsbericht

Nr. B 17 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig

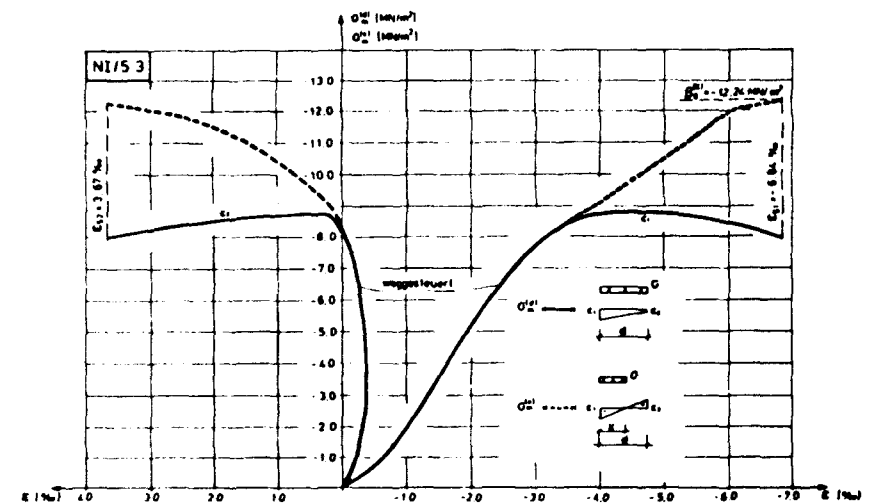
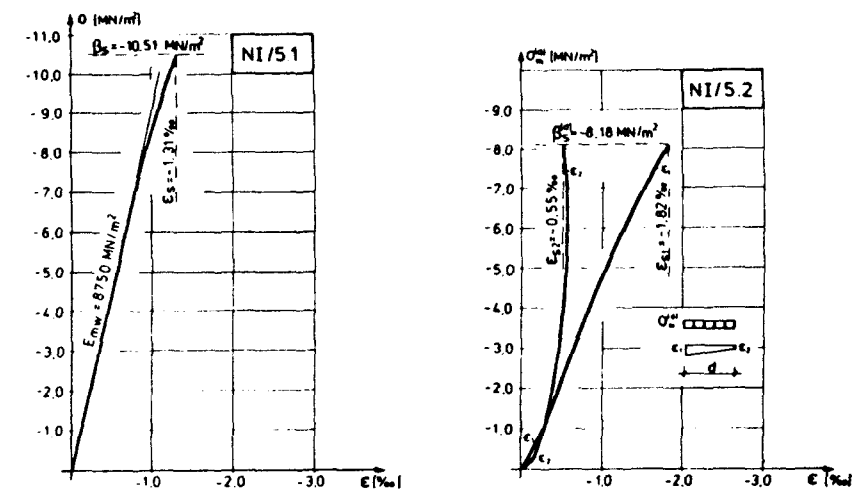


Bild 71: Spannungs-Dehnungs-Linien zentrisch oder exzentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Anlage 59 zum Untersuchungsbericht

Nr. B 17 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig

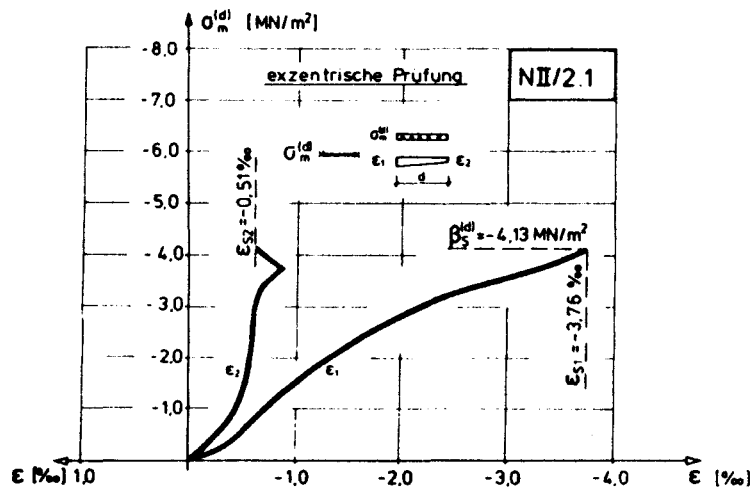
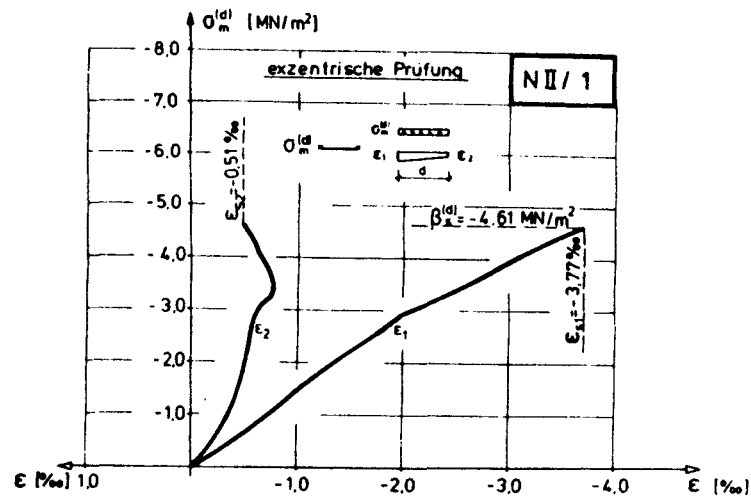


Bild 72: Spannungs-Dehnungs-Linien exzentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Anlage 60 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

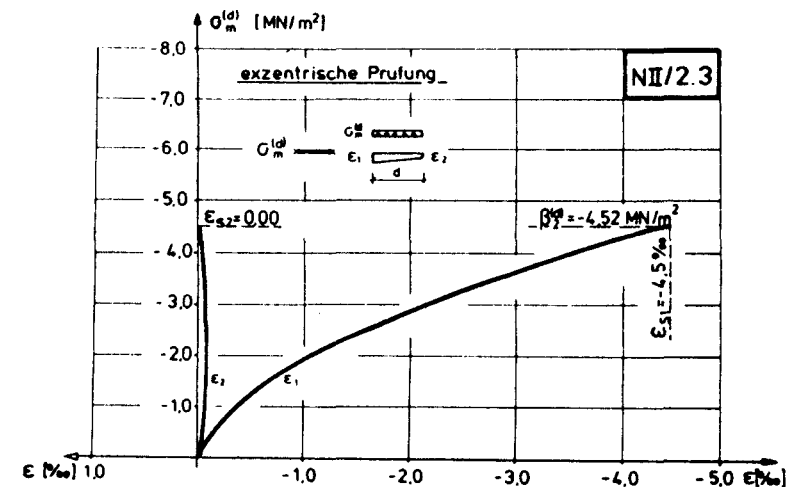
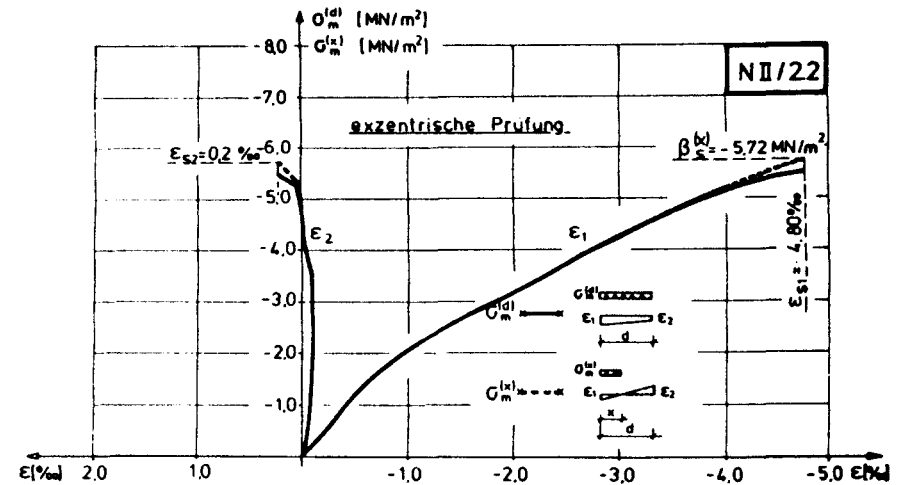


Bild 73: Spannungs-Dehnungs-Linien exzentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Anlage 61 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

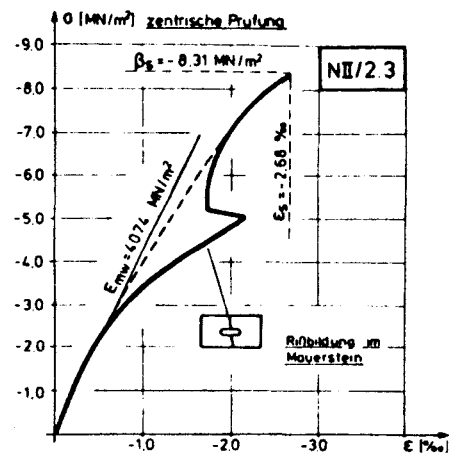
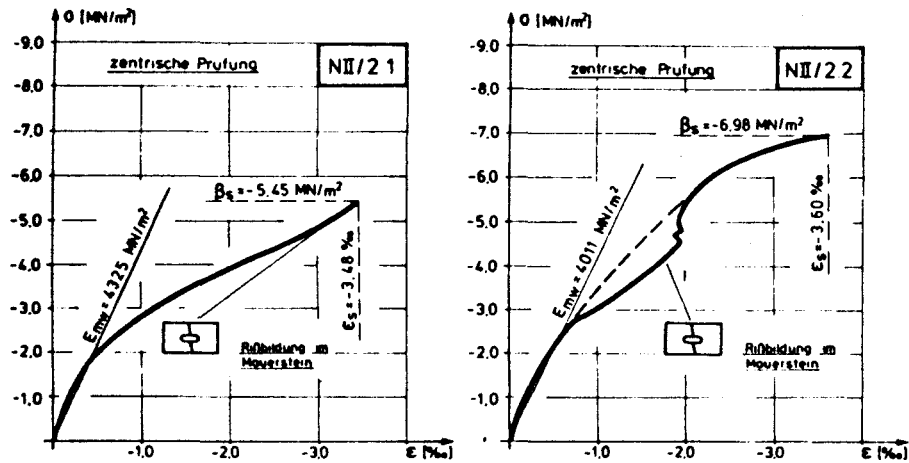


Bild 74: Spannungs-Dehnungs-Linien zentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 62 zum
Untersuchungs-
bericht

Nr. B 17 810787 - 6

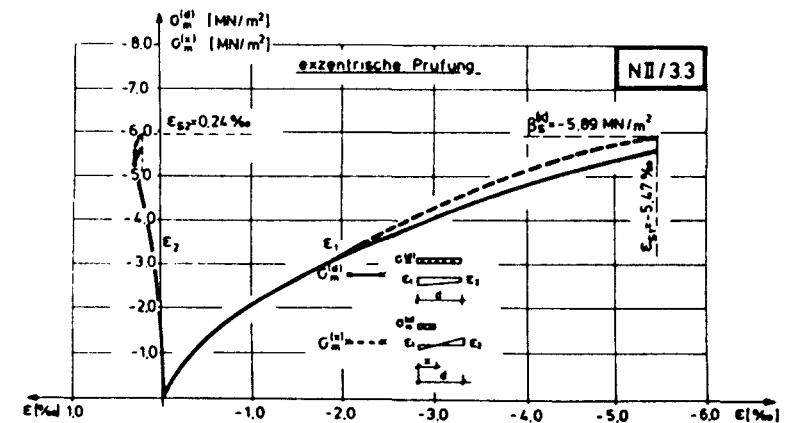
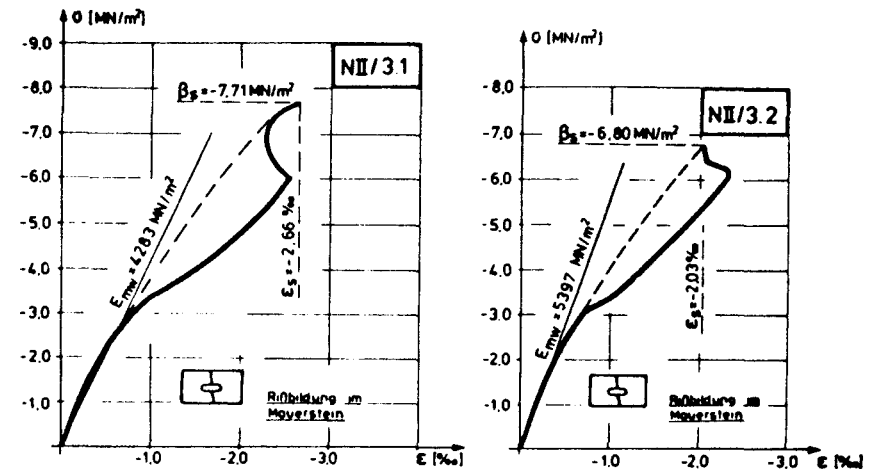


Bild 75: Spannungs-Dehnungs-Linien zentrisch oder exzentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 63 zum
Untersuchungs-
bericht

Nr. B 17 810787 - 6

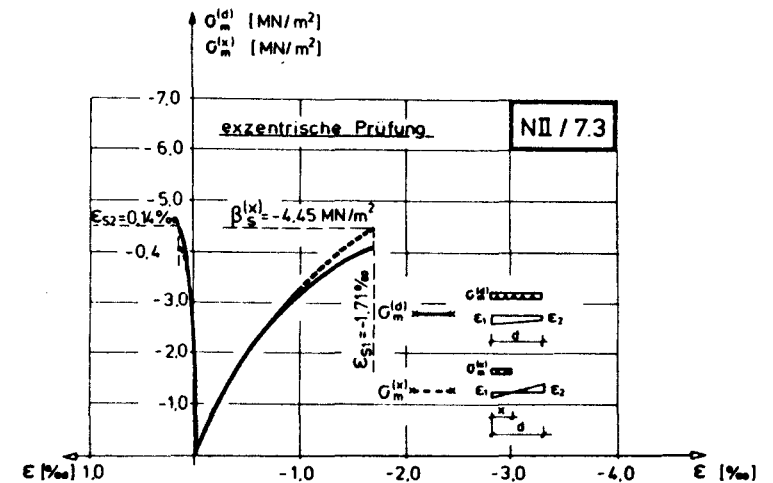
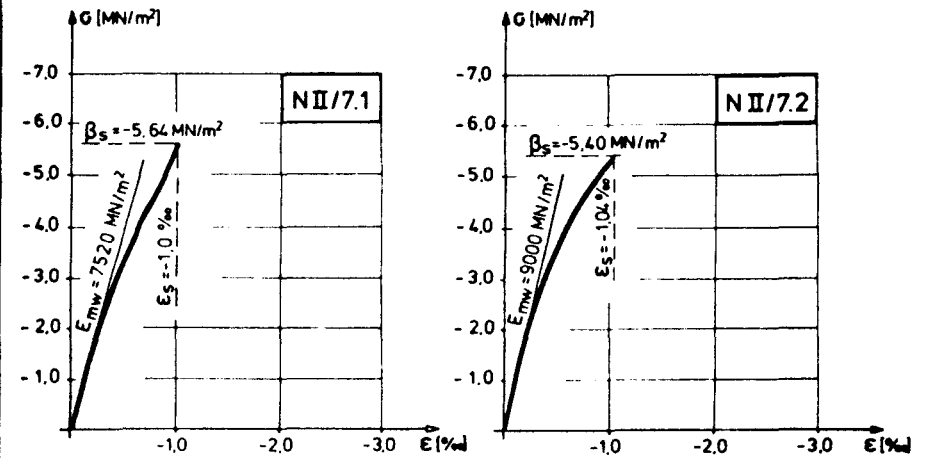
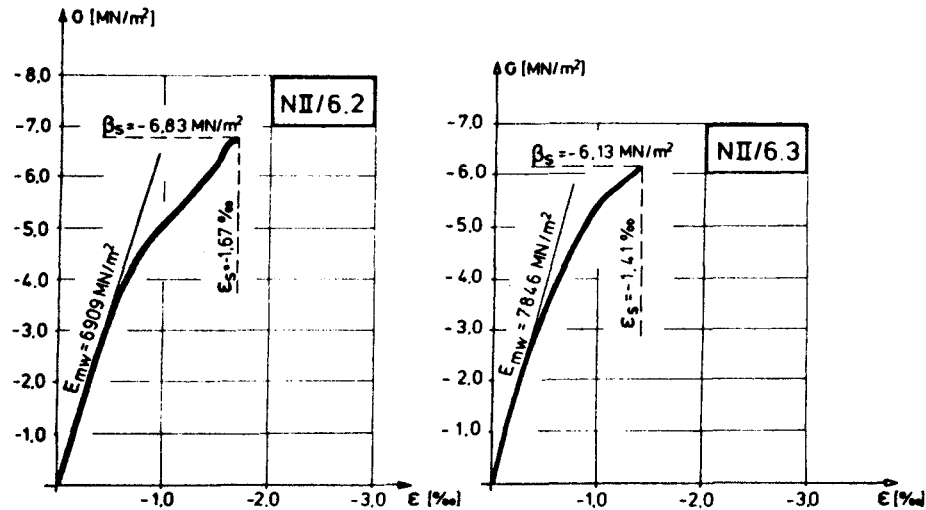
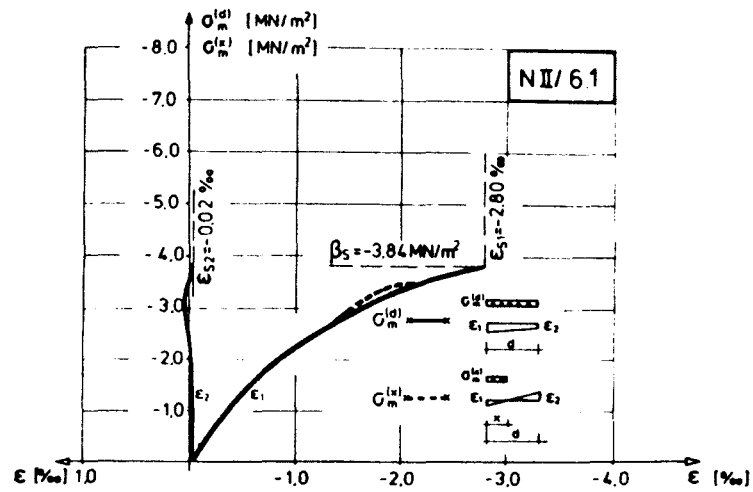


Bild 76: Spannungs-Dehnungs-Linien zentrisch oder exzentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Anlage 64 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B 17 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Bild 77: Spannungs-Dehnungs-Linien zentrisch oder exzentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Anlage 65 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B 17 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

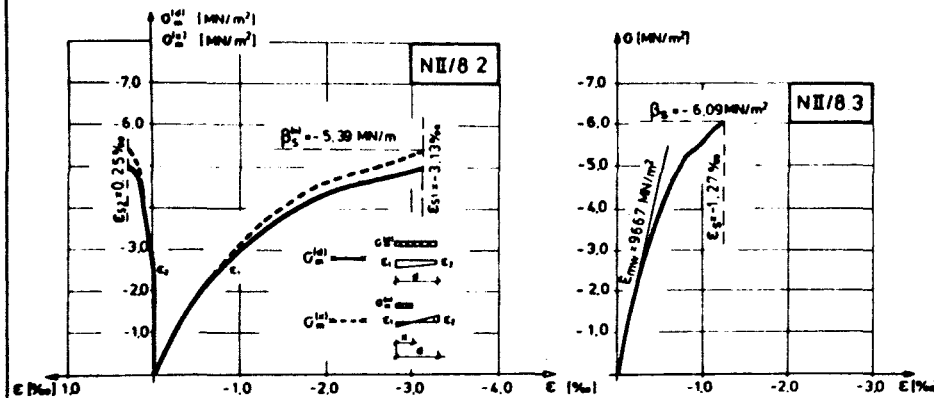
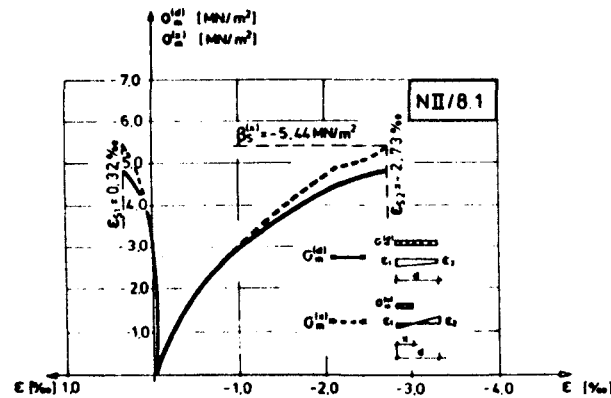


Bild 78: Spannungs-Dehnungs-Linien zentrisch oder exzentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 66 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. 817 810787 - 6

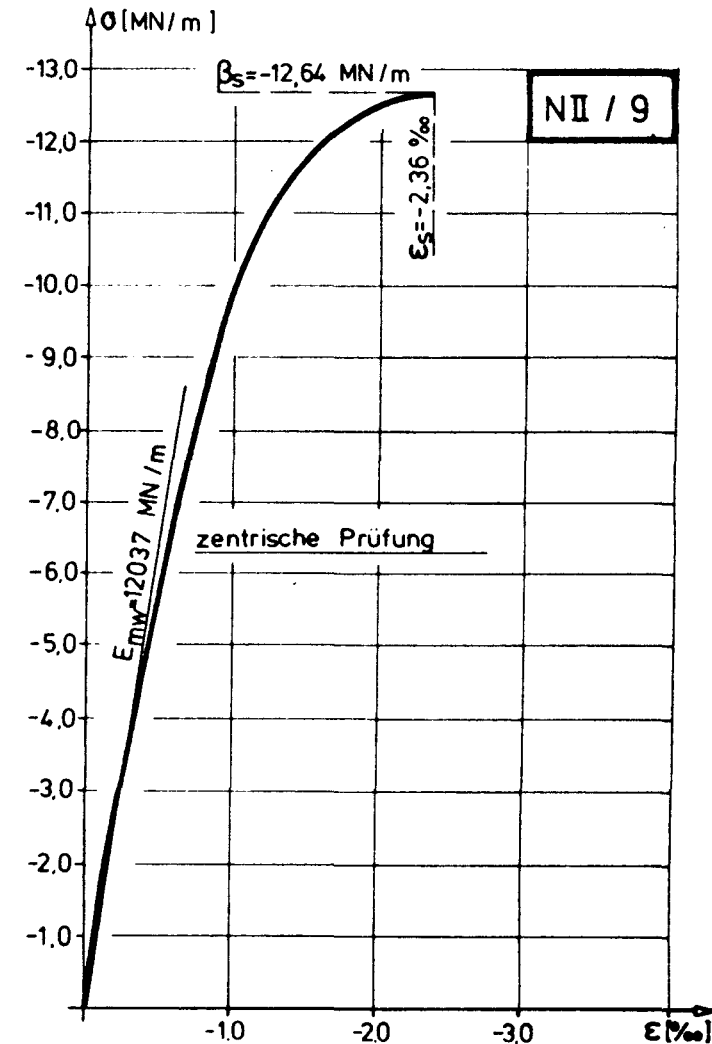


Bild 79: Spannungs-Dehnungs-Linie eines zentrisch geprüften Norm-Prüfkörpers

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 67 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. 817 810787 - 6

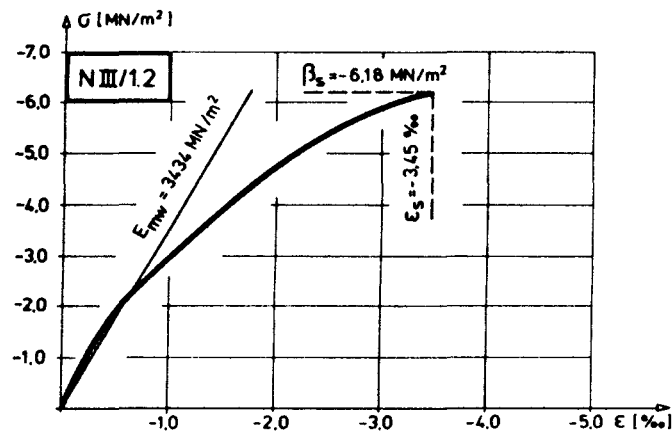
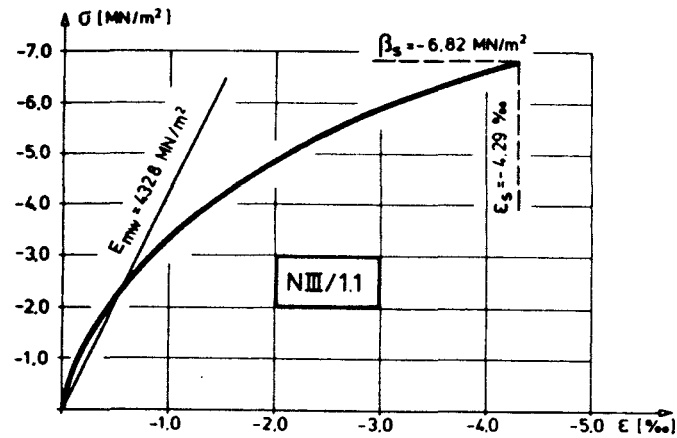


Bild 80: Spannungs-Dehnungs-Linien zentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 68 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B 17 810787 - 6

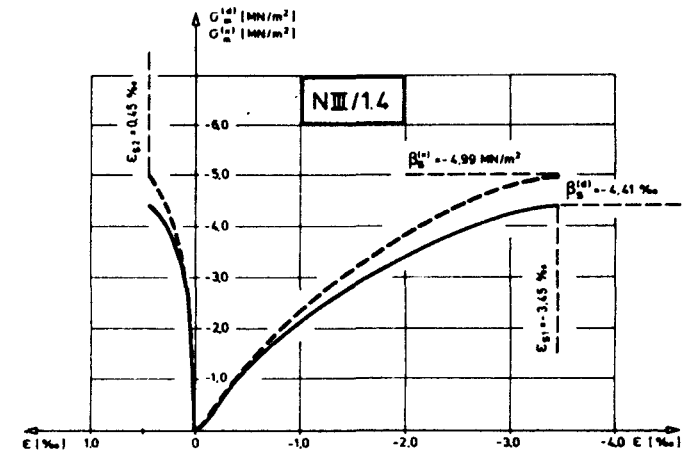
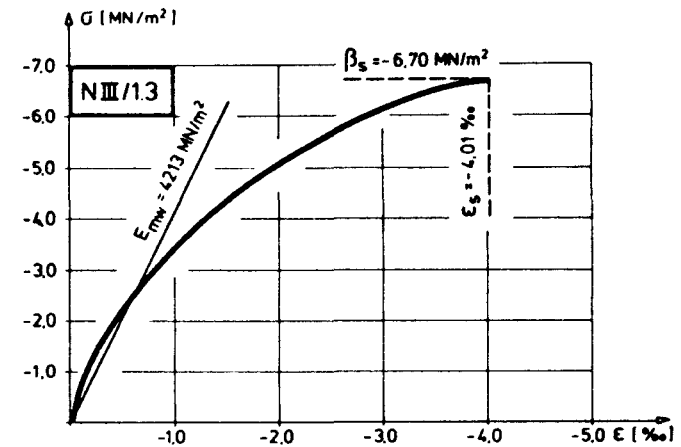


Bild 81: Spannungs-Dehnungs-Linien zentrisch oder exzentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 69 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B 17 810787 - 6

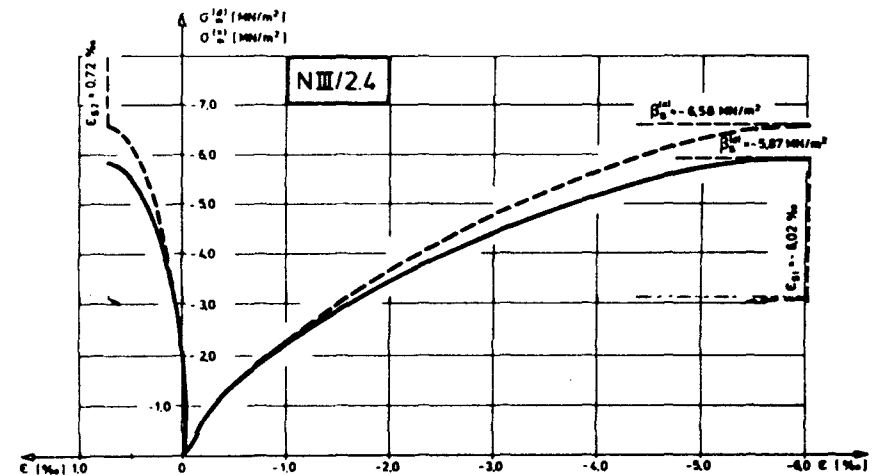
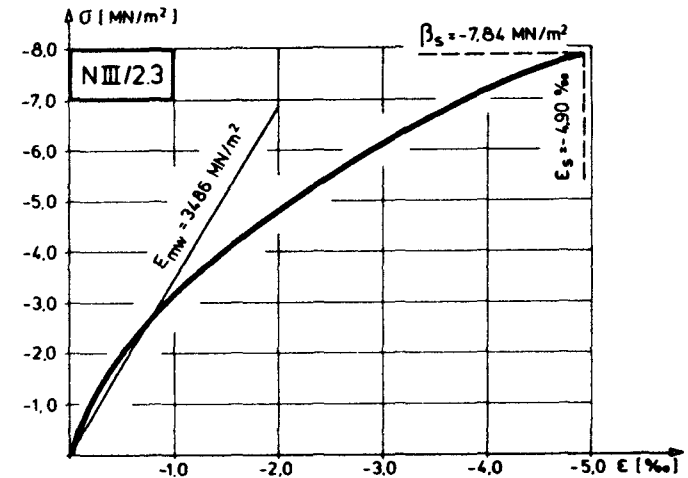
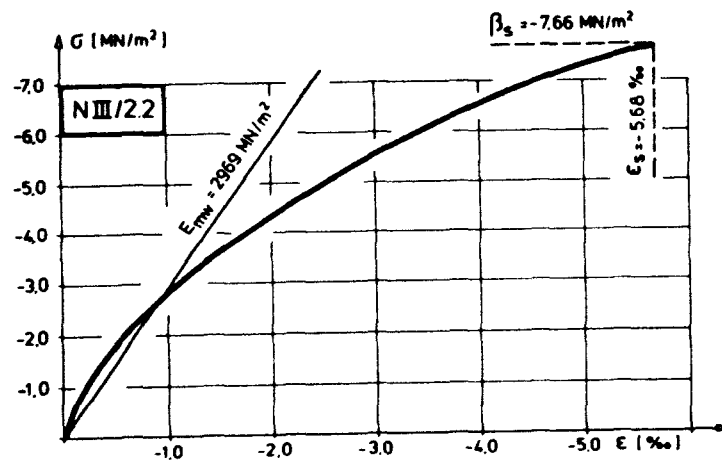
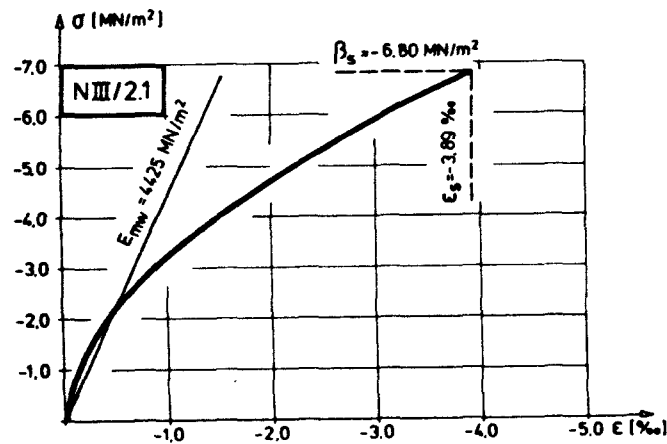


Bild 82: Spannungs-Dehnungs-Linien zentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Anlage 70 zum
Untersuchungs-
bericht

Nr. B I 7 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

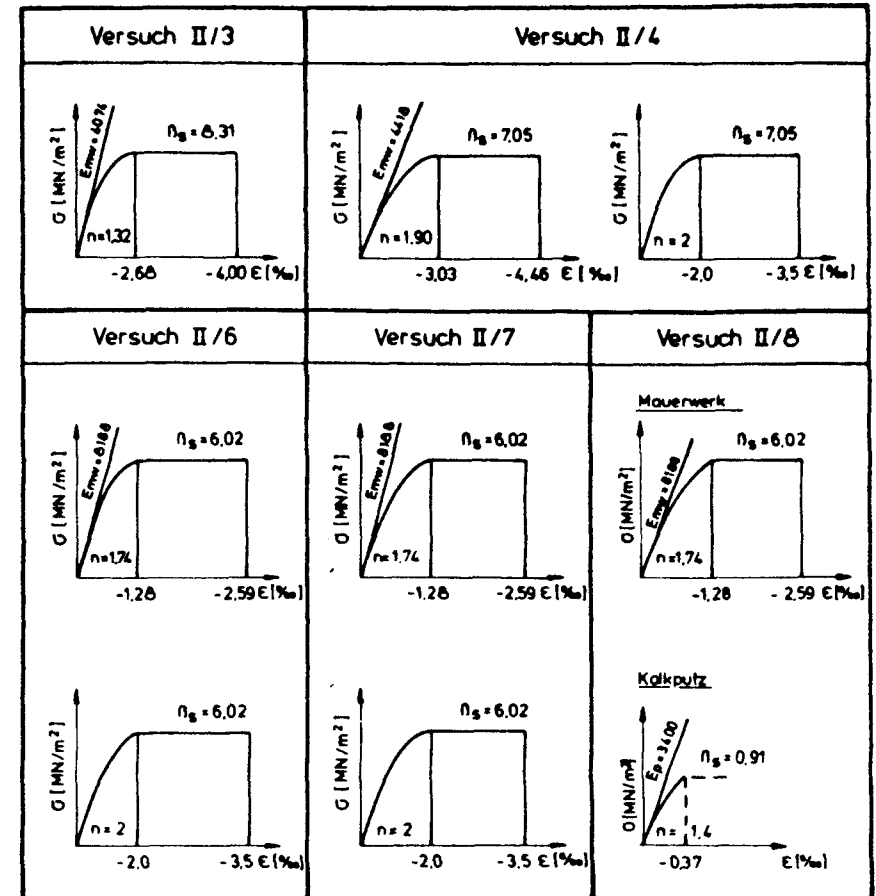
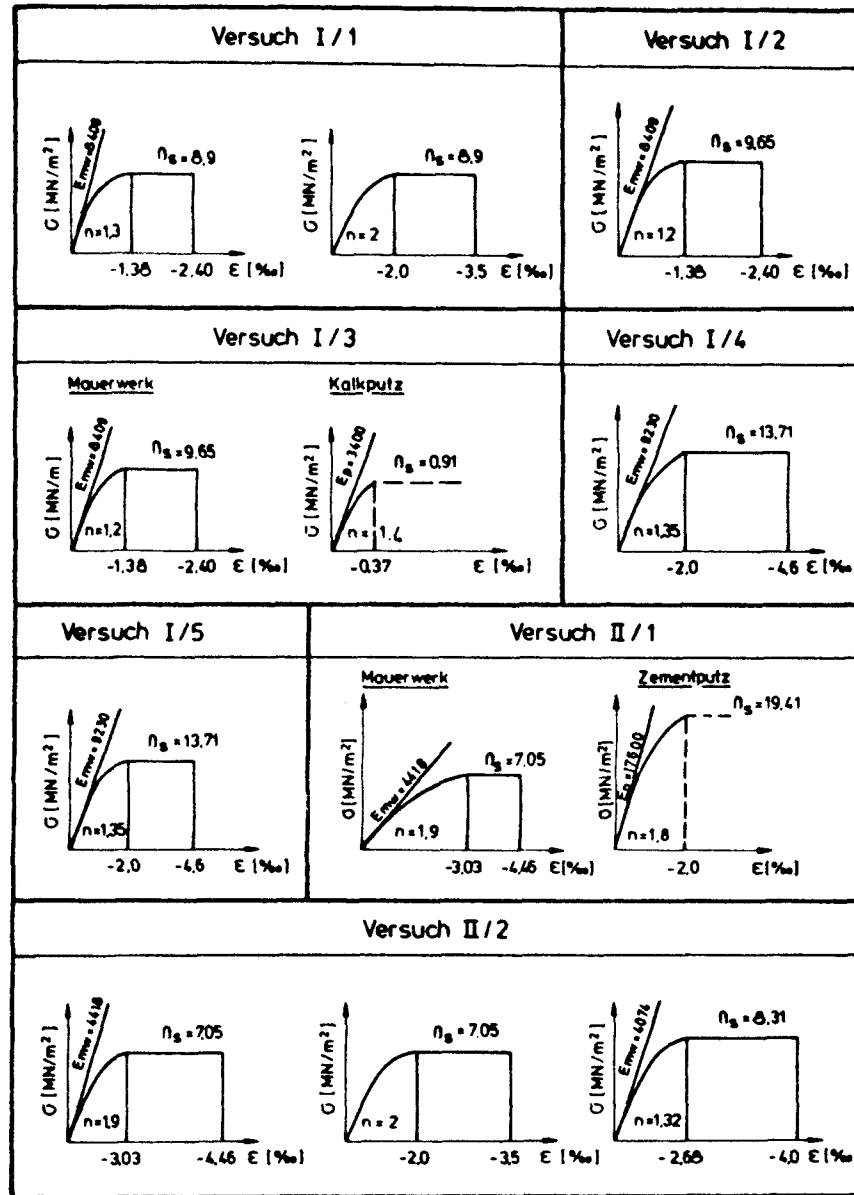
Bild 83: Spannungs-Dehnungs-Linien zentrisch oder exzentrisch geprüfter Norm-Prüfkörper

Anlage 71 zum
Untersuchungs-
bericht

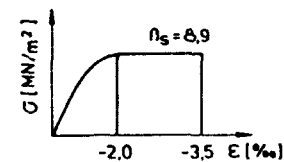
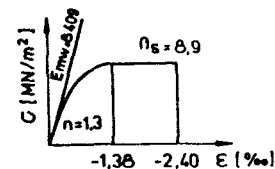
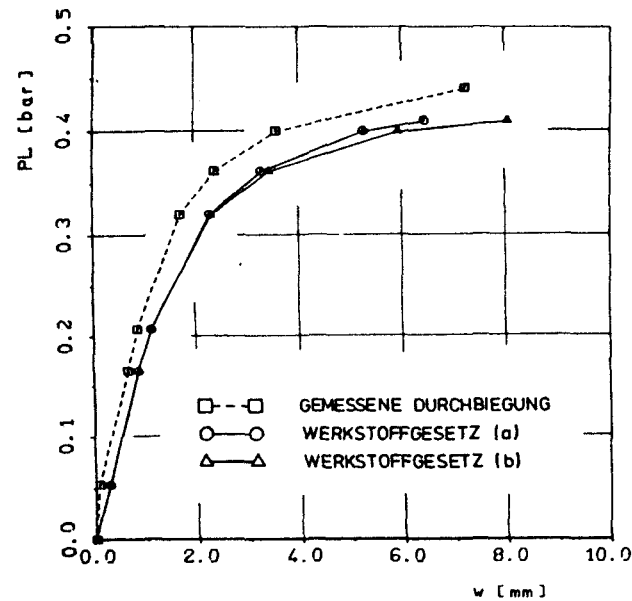
Nr. B I 7 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Bild 84: Für Durchbiegungsberechnungen verwendete Materialgesetze



VERSUCH I/1
VERGLEICH DER GEMESSENEN UND BERECHNETEN
DURCHBIEGUNGEN IN WANDMITTE



VERSUCH I/2
VERGLEICH DER GEMESSENEN UND BERECHNETEN
DURCHBIEGUNGEN IN WANDMITTE

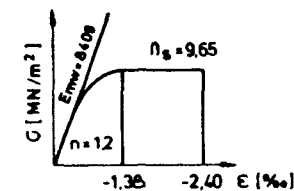
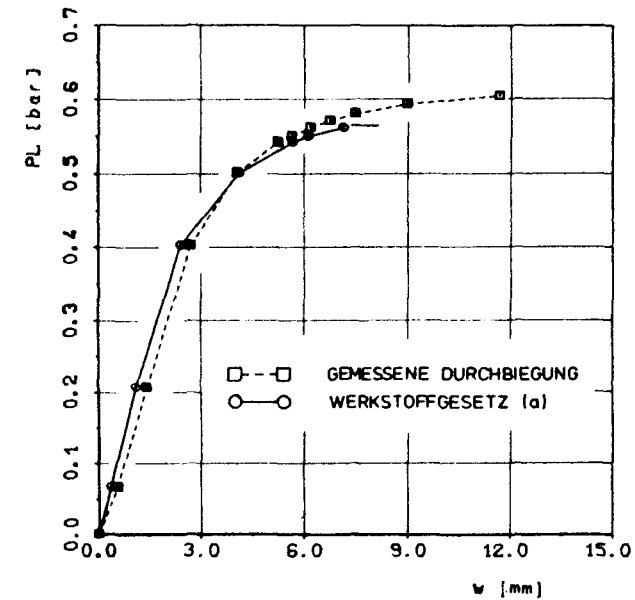


Bild 85: Vergleich gemessener und gerechneter Durchbiegungen

Anlage 73 zum
Untersuchungs-
bericht

Nr. 817 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

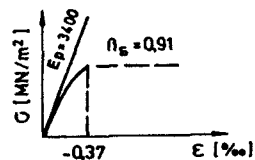
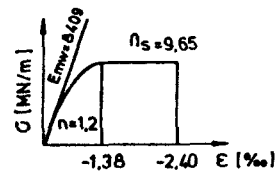
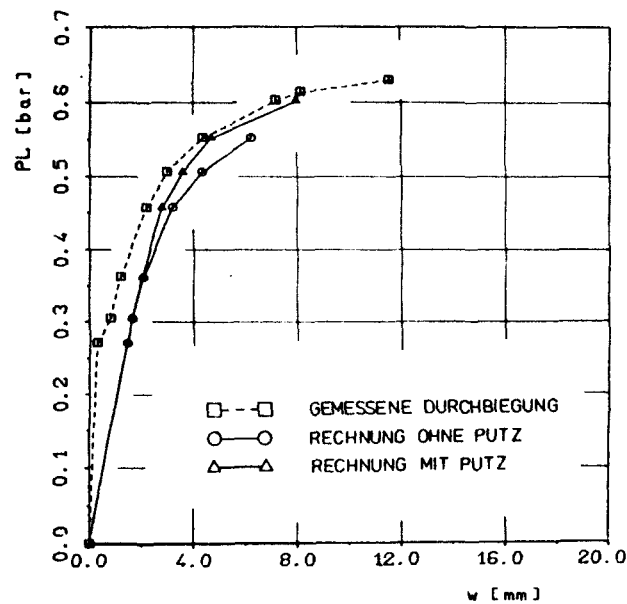
Bild 86: Vergleich gemessener und gerechneter Durchbiegungen

Anlage 74 zum
Untersuchungs-
bericht

Nr. 817 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

VERSUCH I/3

VERGLEICH DER GEMESSENEN UND BERECHNETEN
DURCHBIEGUNGEN IN WANDMITTE

VERSUCH I/4

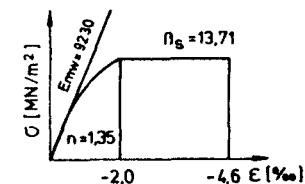
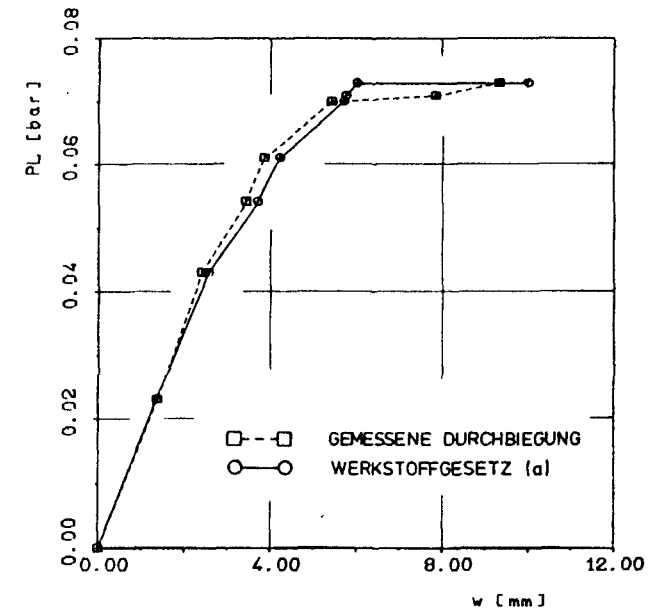
VERGLEICH DER GEMESSENEN UND BERECHNETEN
DURCHBIEGUNGEN IN WANDMITTE

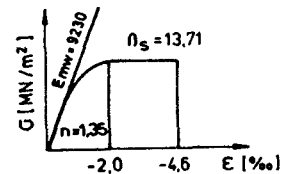
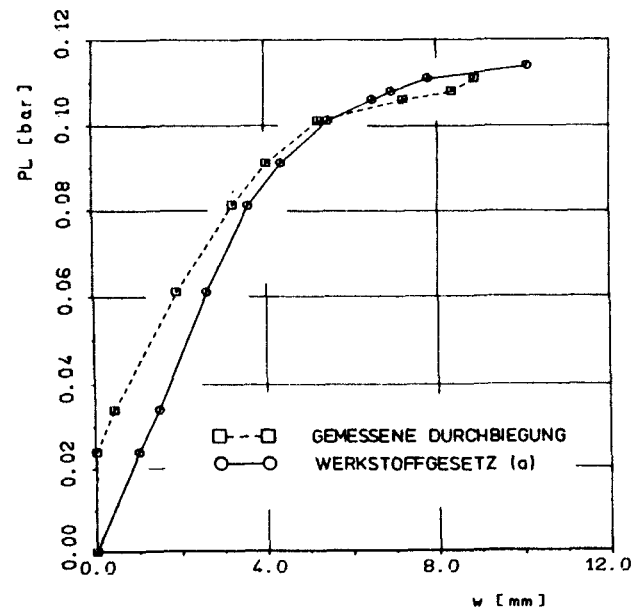
Bild 87: Vergleich gemessener und gerechneter Durchbiegungen

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität BraunschweigAnlage 75 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B 17 810787 - 6

Bild 88: Vergleich gemessener und gerechneter Durchbiegungen

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität BraunschweigAnlage 76 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B 17 810787 - 6

VERSUCH I/5
VERGLEICH DER GEMESSENEN UND BERECHNETEN
DURCHBIEGUNGEN IN WANDMITTE



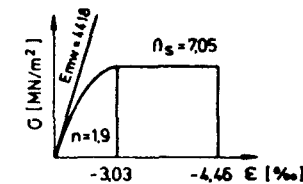
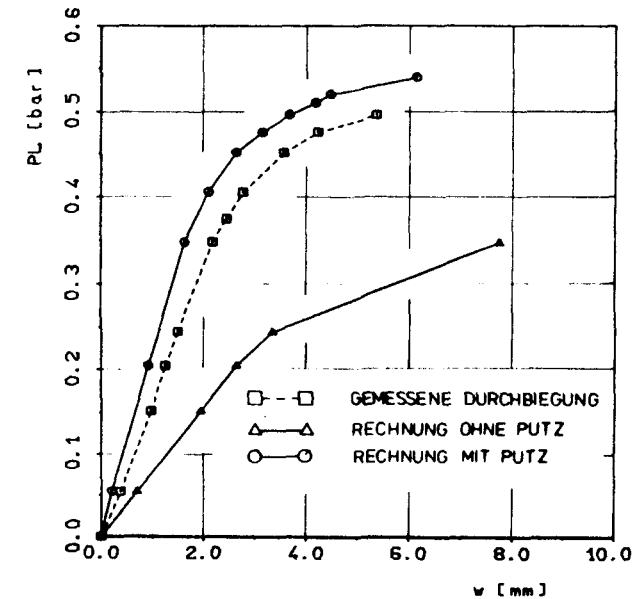
WERKSTOFFGESETZ (a)

Bild 89: Vergleich gemessener und gerechneter Durchbiegungen

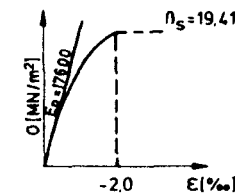
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 77 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

VERSUCH II/1
VERGLEICH DER GEMESSENEN UND BERECHNETEN
DURCHBIEGUNGEN IN WANDMITTE



WERKSTOFFGESETZ
FÜR MAUERWERK



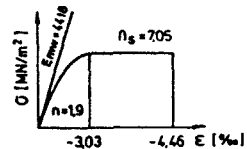
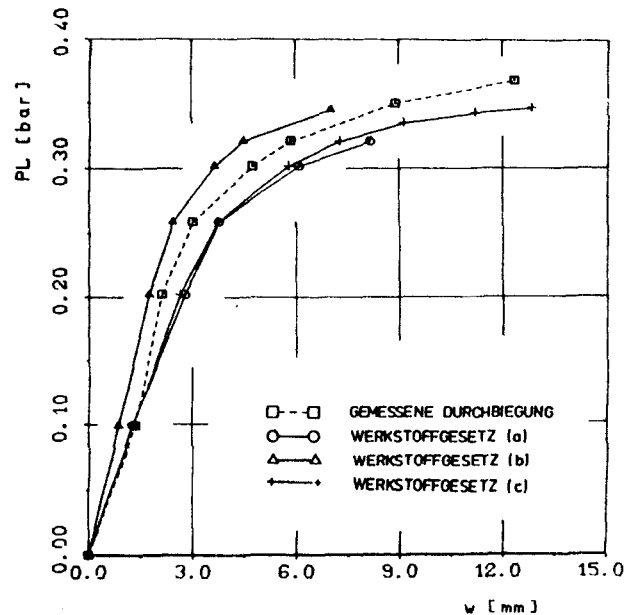
WERKSTOFFGESETZ
FÜR ZEMENTPUTZ

Bild 90: Vergleich gemessener und gerechneter Durchbiegungen

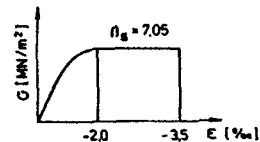
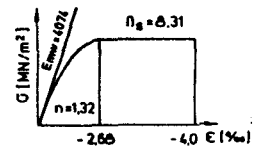
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 78 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6

VERSUCH II/2

VERGLEICH DER GEMESSENEN UND BERECHNETEN
DURCHBIEGUNGEN IN WANDMITTE

WERKSTOFFGESETZ (a)

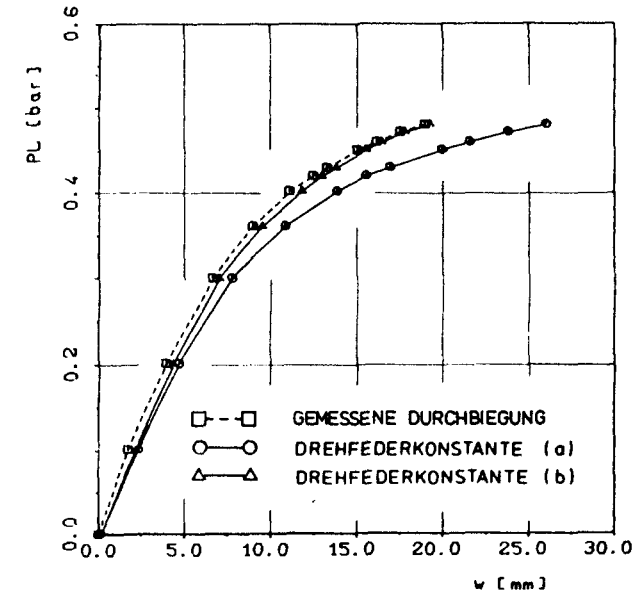
WERKSTOFFGESETZ (b)
NACH DIN 1045

WERKSTOFFGESETZ (c)

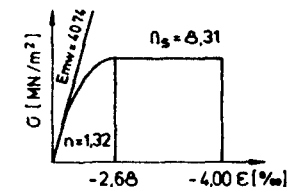
Bild 91: Vergleich gemessener und gerechneter Durchbiegungen

Anlage 79 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6.Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

VERSUCH II/3

VERGLEICH DER GEMESSENEN UND BERECHNETEN
DURCHBIEGUNGEN IN WANDMITTE

VERWENDETES WERKSTOFFGESETZ

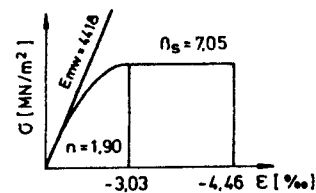
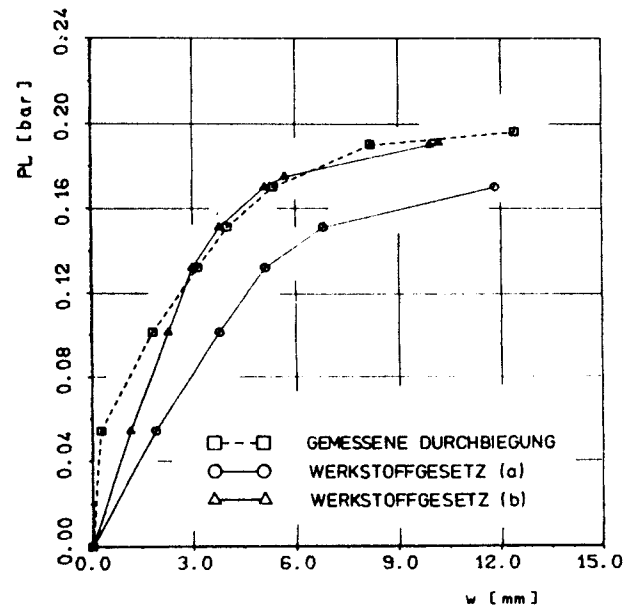
DREHFEDERSTEIFIGKEITEN AM
KOPF- UND FUSSPUNKT:

- (a) $c_F = 1156 \text{ kNm/rad}$ [$J^2 = 0.5 J^1$]
 (b) $c_F = 1275 \text{ kNm/rad}$ [$J^2 = 0.6 J^1$]

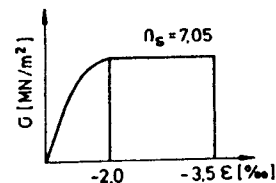
Bild 92: Vergleich gemessener und gerechneter Durchbiegungen

Anlage 80 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B I 7 810787 - 6.Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

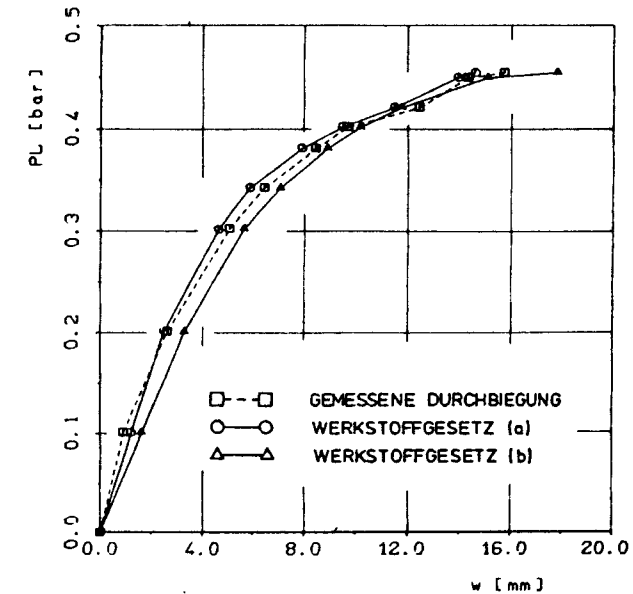
VERSUCH II/4
VERGLEICH DER GEMESSENEN UND BERECHNETEN
DURCHBIEGUNGEN IN WANDMITTE



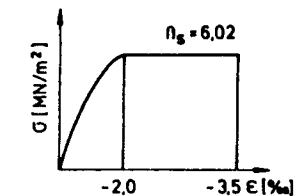
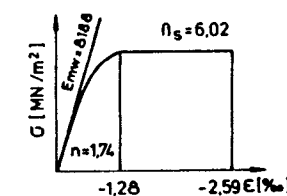
WERKSTOFFGESETZ (a)

WERKSTOFFGESETZ (b)
NACH DIN 1045

VERSUCH II/6
VERGLEICH DER GEMESSENEN UND BERECHNETEN
DURCHBIEGUNGEN IN WANDMITTE



WERKSTOFFGESETZ (a)

WERKSTOFFGESETZ (b)
NACH DIN 1045

DREHFEDERKONSTANTE AM
KOPF- UND FUSSPUNKT

$$c_F = 1714 \text{ kNm/rad} \quad [J^3 = 0.4 J^1]$$

(bei beiden Werkstoffgesetzen verwendet)

Bild 93: Vergleich gemessener und gerechneter Durchbiegungen

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

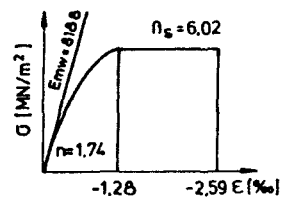
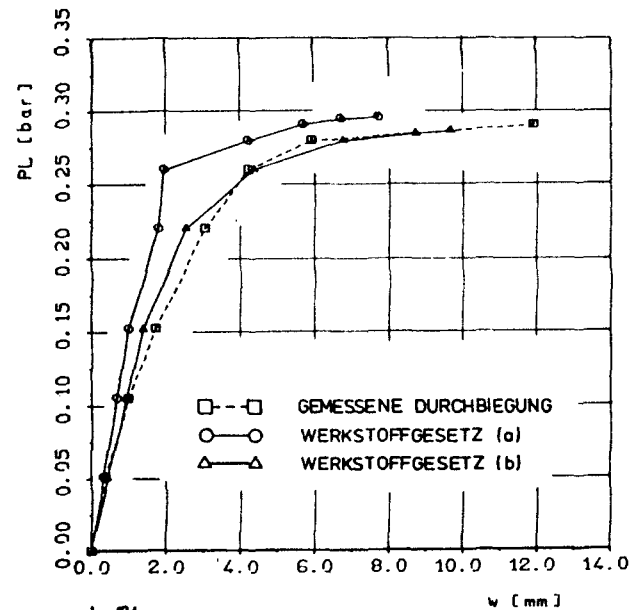
Anlage 81 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B 17 810787 - 6

Bild 94: Vergleich gemessener und gerechneter Durchbiegungen

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Anlage 82 zum
Untersuchungs-
bericht
Nr. B 17 810787 - 6

VERSUCH II/7

VERGLEICH DER GEMESSENEN UND BERECHNETEN
DURCHBIEGUNGEN IN WANDMITTE

WERKSTOFFGESETZ (a)

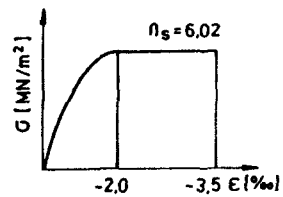
WERKSTOFFGESETZ (b)
NACH DIN 1045

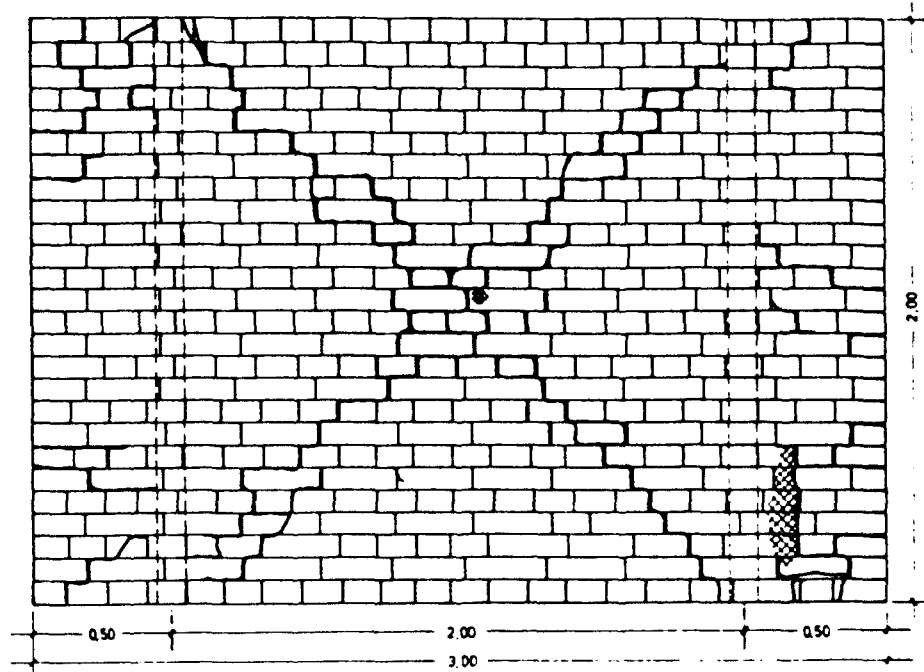
Bild 95: Vergleich gemessener und gerechneter Durchbiegungen

Anlage 83 zum
Untersuchungs-
bericht

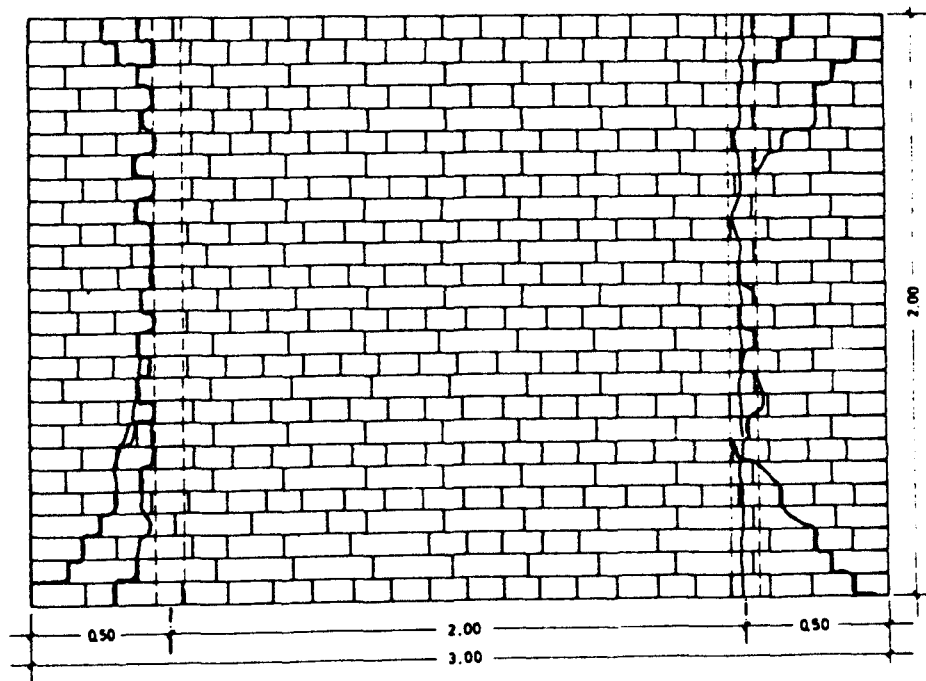
Nr. B I 7 810787 - 6

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig

Rissbild der Mauerwerkswand III/1
Lastabgewandte Seite



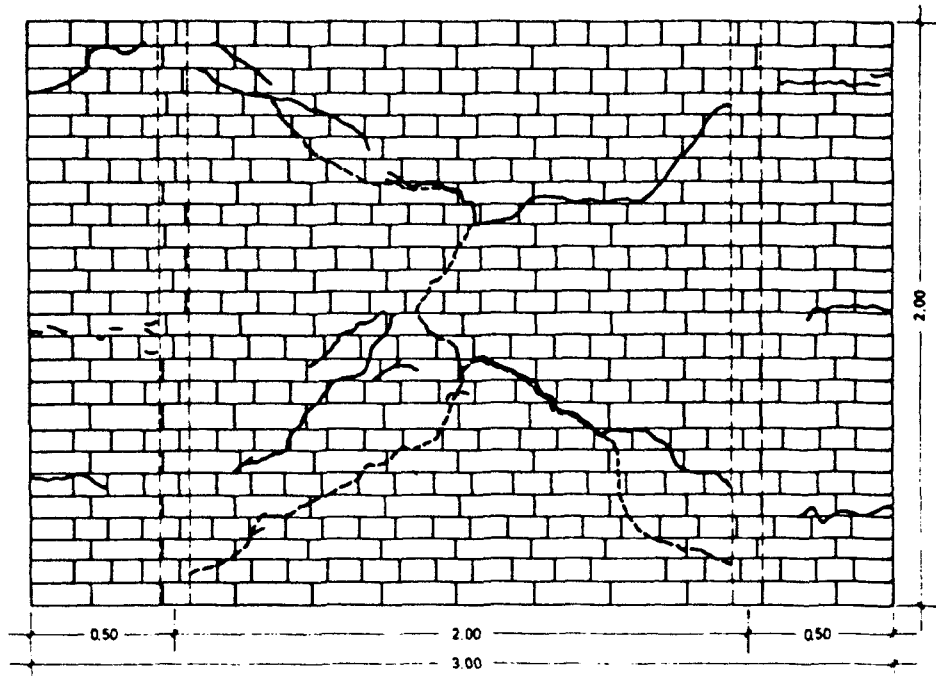
Rissbild der Mauerwerkswand III/1
Druckkissenseite



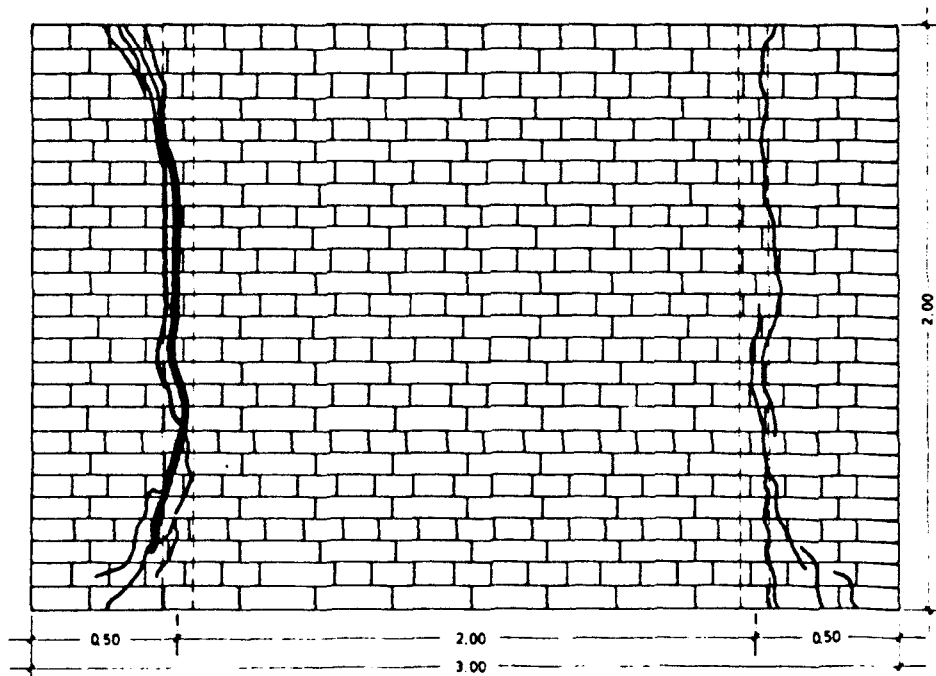
— Rissverlauf
XXXXX Abplatzungen

Bild 96: Rißbild der Mauerwerkswand III/1

Rissbild der Mauerwerkswand III/2
Lastabgewandte Seite



Rissbild der Mauerwerkswand III/2
Druckkissenseite



- Rissverlauf im frühen Laststadium
- - - Rissverlauf im späten Laststadium
- stark klaffende Risse

Bild 97: Rißbild der Mauerwerkswand III/2

Anlage 85 zum
Untersuchungs-
bericht